

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE
TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE
TELECOMUNICACIÓN
TRABAJO FIN DE GRADO**

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE
SIMULACIÓN DE 5G-NR PARA EVALUAR
LAS PRESTACIONES DE DIFERENTES
SERVICIOS**

JAVIER HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

2021

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Diseño de una herramienta de simulación de 5G-NR para evaluar las prestaciones de diferentes servicios

Autor: D. Javier Hernández Sánchez

Tutor: D. José Manuel Riera Salís

Departamento: Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones (SSR)

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

Los miembros del tribunal arriba nombrados acuerdan otorgar la calificación de:

Madrid, a de de 20...

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN
TRABAJO FIN DE GRADO**

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE
SIMULACIÓN DE 5G-NR PARA EVALUAR
LAS PRESTACIONES DE DIFERENTES
SERVICIOS**

JAVIER HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

2021

RESUMEN

En este trabajo se analizaron las comunicaciones móviles de 5ª generación, en concreto la tecnología *New Radio* catalogada como estándar IMT-2020 por el ITU-R. Dicha tecnología fue desarrollada por 3GPP, un organismo internacional formado por multitud de organismos y de compañías de todo el mundo.

En primer lugar, se profundizó en el contenido teórico, analizando en detalle las especificaciones de esta nueva tecnología. Más tarde, se describió la arquitectura del simulador desarrollado. Dicho simulador nos permitió poner a prueba a *New Radio* sobre diversos escenarios, en concreto una microcélula en entornos urbanos e industriales.

Tras simular y obtener los resultados, se analizaron las prestaciones obtenidas y si eran suficientes para proveer ciertos servicios. En términos de capacidad y granularidad de red, *New Radio* ofreció muy buenas prestaciones. Sin embargo, los resultados obtenidos en términos de latencia fueron bastante pobres para lo que esperábamos de *New Radio*. No obstante, estos resultados podrían mejorar notablemente con una elección más apropiada de ciertos parámetros de red e incorporando técnicas de multiplexación espacial.

SUMMARY

In this work, the 5th generation of mobile communications were analysed, specifically the *New Radio* technology, which was classified as an IMT-2020 technology standard by the ITU-R. This technology was developed by 3GPP, an international organization formed by a multitude of companies and organizations around the world.

In the first place, the specifications of this technology will be seen in detail, deepening in its theoretical content. Later on, the developed simulator's architecture was described. This simulator allowed us to test *New Radio* technology on different scenarios, specifically a microcell in urban and industrial environments.

After obtaining the simulation results, they were analysed if the obtained capabilities were enough to provide certain services. In terms of capacity and network granularity, *New Radio* offered very good features. However, the results obtained in terms of latency were quite poor for what we expected from New Radio. Nevertheless, these results could be remarkably improved with a more appropriate choice of certain network parameters and incorporating spatial multiplexing techniques.

PALABRAS CLAVE

5G, NR, IMT-2020, 3GPP, Release, ITU-R, Planificador, Microcélula, Simulador, Estación base, Terminal, Entorno, Urbano, Industrial, Fábrica, Latencia, Capacidad, Tasa, Binaria, Modulación, Código, Consumo, Energía.

KEYWORDS

5G, NR, IMT-2020, 3GPP, Release, ITU-R, Scheduler, Microcell, Simulator, Base station, Terminal, Environment, Urban, Industrial, Factory, Latency, Capacity, Rate, Binary, Modulation, Code, Consumption, Energy.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	1
FIGURAS.....	3
TABLAS	5
ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS	6
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	11
1.1. INTRODUCCIÓN	11
1.2. OBJETIVOS	12
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	12
2. SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES 5G	13
2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO	13
2.1.1. VISIÓN Y CASOS DE USO DE 5G.....	13
2.1.2. ARQUITECTURA DE RED	15
2.1.3. INTERFAZ RADIO.....	17
2.1.4. CANALES Y SEÑALES.....	26
2.1.5. ESTADOS DE CONEXIÓN	29
2.1.6. PLANIFICACIÓN DE RECURSOS RADIO	31
3. ARQUITECTURA DEL SIMULADOR	33
3.1. ARQUITECTURA GENERAL	33
3.2. SIMULADOR.....	34
3.3. ESTACIÓN BASE.....	34
3.4. TERMINALES MÓVILES.....	35
3.5. PARÁMETROS Y MODELOS DE PROPAGACIÓN RADIO	38
4. RESULTADOS.....	40
4.1. MICROCELDA URBANA	40
4.2. MICROCELDA INDUSTRIAL	44
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	46
5.1. CONCLUSIONES	46
5.2. LÍNEAS FUTURAS	47
6. BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXO A: ASPECTOS ÉTICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES	49
A.1 INTRODUCCIÓN	49
A.2 IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO	49
A.3 EFECTOS ADVERSOS DE 5G SOBRE LA SALUD HUMANA.....	49

A.4 CONCLUSIONES	52
ANEXO B: PRESUPUESTO ECONÓMICO	53

FIGURAS

FIGURA 2.1 - Escenarios de uso IMT-2020 [1]	13
FIGURA 2.2 - Prestaciones de cada escenario de uso IMT-2020 [1]	14
FIGURA 2.3 - Prestaciones IMT-2020 [1]	14
FIGURA 2.4 - Arquitectura de red 5G [2]	15
FIGURA 2.5 - Pila de protocolos de 5G [2]	15
FIGURA 2.6 - Áreas de localización en 5G [2]	16
FIGURA 2.7 - Identificadores de red 5G [5]	16
FIGURA 2.8 - Identidad de usuario 5G [5]	16
FIGURA 2.9 - Tipologías de Red de Acceso Radio [2]	17
FIGURA 2.10 - Atenuación atmosférica [7]	19
FIGURA 2.11 - Rejilla de recursos OFDM [5]	20
FIGURA 2.12 - Rejilla de recursos en NR [2]	20
FIGURA 2.13 - Estructura temporal en NR [6]	21
FIGURA 2.14 - Capa física [2]	22
FIGURA 2.15 - Canales lógicos, físicos y de transporte [2]	26
FIGURA 2.16 - Estructura del bloque SS/PBCH [2]	27
FIGURA 2.17 - Señal a la salida del filtro correlador	28
FIGURA 2.18 - Señales de sincronización y barrido de haces [2]	28
FIGURA 2.19 - Varios formatos de señales CSI-RS [5]	29
FIGURA 2.20 - Establecimiento de conexión en 5G-NR [6]	29
FIGURA 2.21 - Acceso aleatorio en NR [6]	30
FIGURA 2.22 - Estados de conexión en 5G [2]	30
FIGURA 2.23 - Algoritmo de planificación proporcional [5]	31
FIGURA 2.24 - Algoritmo de máxima tasa [5]	31
FIGURA 2.25 - Planificación de recursos en dos dimensiones [5]	32
FIGURA 3.1 – Estructura del simulador	33
FIGURA 3.2 – Funciones de la estación base 1	34
FIGURA 3.3 - Funciones de la estación base 2	34
FIGURA 3.4 - Funciones de la estación base 3	35
FIGURA 3.5 - Funciones de la estación base 4	35
FIGURA 3.6 - Funciones de la estación base 5	35
FIGURA 3.7 - Funciones de la estación base 6	35
FIGURA 3.8 - Funciones de la estación base 7	35
FIGURA 3.9 - Funciones del terminal móvil 1	35
FIGURA 3.10 - Categoría de terminal 0	36
FIGURA 3.11 - Categoría de terminal 1	36
FIGURA 3.12 - Categoría de terminal 2	36
FIGURA 3.13 - Categoría de terminal 3	36
FIGURA 3.14 - Categoría de terminal 4	36
FIGURA 3.15 - Categoría de terminal 5	36
FIGURA 3.16 - Categoría de terminal 6	36
FIGURA 3.17 - Categoría de terminal 7	36
FIGURA 3.18 - Funciones del terminal móvil 2	37
FIGURA 3.19 - Funciones del terminal móvil 3	37
FIGURA 3.20 - Funciones del terminal móvil 4	37
FIGURA 3.21 - Estados de conexión del terminal	38
FIGURA 4.1 - Carga celular de la microcelda urbana	41
FIGURA 4.2 - Máximo número de recursos permitidos por terminal	41
FIGURA 4.3 - Número de terminales	41
FIGURA 4.4 - Mapa celular	42
FIGURA 4.5 - Parámetros de un terminal de Categoría 5	43

FIGURA 4.6 - Carga celular de la microcelda industrial.....	44
FIGURA 4.7- Máximo número de recursos permitidos por terminal	45
FIGURA 4.8 - Número de terminales	45
FIGURA 4.9 - Parámetros de un terminal Categoría 2.....	45
FIGURA 5.1 - Comparación de distintas numerologías NR.....	46

TABLAS

TABLA 2.1 - Bandas de frecuencia TDD en FR1 [3]	18
TABLA 2.2 - Bandas de frecuencia FDD en FR1 [3].....	18
TABLA 2.3 - Bandas de frecuencia SUL y SDL en FR1 [3]	19
TABLA 2.4 - Bandas de frecuencia TDD en FR2 [3]	19
TABLA 2.5 - Numerologías disponibles en NR [7]	21
TABLA 2.6 - Numerologías disponibles en cada rango de frecuencias [5]	22
TABLA 2.7 - Tabla 1 CQI [3]	23
TABLA 2.8 - Tabla 2 CQI [3]	23
TABLA 2.9 - Tabla 3 CQI [3]	24
TABLA 2.10 - Tabla 1 MCS [3].....	24
TABLA 2.11 - Tabla 2 MCS [3].....	25
TABLA 2.12 - Tabla 3 MCS [3].....	25
TABLA 3.1 - Constantes del modelo de propagación Rec. P.1411 UIT-R	38
TABLA 4.4.1 - Parámetros microcélula urbana	40
TABLA 4.4.2 - Parámetros entorno industrial.....	44
TABLA A.1 - Restricciones básicas para campos electromagnéticos (0 Hz - 300 GHz).....	51
TABLA A.2 - Restricciones de referencia para campos electromagnéticos (0 Hz - 300 GHz).....	51

ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS

3GPP	Third Generation Partnership Project
5GCN	5G Core Network
5G-GUTI	5G Global Unique Temporary ID
5G-S-TMSI	5G - Shortened - Temporary Mobile Subscriber Identity
<i>Always-on</i>	Siempre encendidas
AMF	Access and Mobility Management Function
<i>AMF Pointer</i>	Puntero AMF
<i>AMF Region</i>	Región AMF
<i>AMF Set</i>	Conjunto AMF
ARQ	Automatic Repeat Request
<i>Bandwidth Part</i>	Parte de Ancho de Banda
<i>Base Station</i>	Estación Base
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BLER	Block Error Rate
BOE	Boletín Oficial del Estado
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
<i>Carrier</i>	Portadora
CCCH	Common Control Channel
CEPT	Conferencia Europea de administración Postal y Telecomunicaciones
CI	Cell Identity
<i>Connected</i>	Conectado
<i>Connecting</i>	Conectando
<i>Control Plane</i>	Plano de control
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Code
CRS	Channel Reference Signals
CSI	Channel State Information
CSI-IM	CSI - Interference Measurement
CSI-RS	CSI - Reference Signal
CTE	Código Técnico
Datarate	Velocidad de datos
DCCH	Dedicated Control Channel

DCI	Downlink Control Information
DFT	Discrete Fourier Transform
DFT-S-OFDM	DFT-Spread-OFDM
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signal
DRX	Discontinuous Reception
DTCH	Dedicated Traffic Channel
<i>Dynamic Grant</i>	Permiso Dinámico
<i>Edge Computing</i>	Computación en el borde
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	enhanced Node-B (Estación Base LTE)
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
<i>Frame</i>	Trama
<i>Frequency Band</i>	Banda de frecuencia
gNB	g Node-B (Estación Base NR)
gNB-CU	gNB – Central Unit
gNB-DU	gNB – Distributed Unit
GSM	Global System for Mobile Communications
GUAMI	Global Unique AMF ID
HSPA	High-Speed Packet Access
ICNIRP	International Commission for the Protection Against Non-Ionizing Radiations
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
IMT-2020	International Mobile Telecommunications 2020
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
ISI	Inter Symbol Interference
ITU-R	International Telecommunications Union - Radiocommunications
<i>Layer</i>	Capa
LDPC	Low Density Parity Check
LGT	Ley General de Telecomunicaciones
<i>Listen-Before-Talk</i>	“Escuchar antes de hablar”

LTE	Long Term Evolution
LTE-Advanced	Long Term Evolution - Advanced
MAC	Medium Access Control
<i>Machine Learning</i>	Aprendizaje máquina
MCC	Mobile Country Code
MCS	Modulation and Coding Scheme
ME	Mobile Equipment
MIMO	Multiple Input Multiple Output
<i>mMTC</i>	massive Machine Type Communications
MNC	Mobile Network Code
<i>mmWave</i>	Ondas milimétricas
<i>Mobile</i>	Móvil
MSISDN	Mobile Station Integrated Services Digital Network
MU-MIMO	Multi-User MIMO
NAS	Non - Access Stratum
NCGI	NR Cell Global Identity
<i>Network Slicing</i>	Cortes de red
NGCI	NR Cell Global Identity
NR	New Radio
NSA	Non Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OM	Orden Ministerial
<i>Paging</i>	Paginación
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCH	Paging Channel
PCI	Physical Cell Identity
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHY	Physical Layer
PMI	Precoding Matrix Indicator
Polar Code	Código Polar
PRACH	Physical Random Access Channel
PSS	Primary Sincronization Signal
PT-RS	Phase Tracking Reference Signal

PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
Python3	Lenguaje de programación Python3
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RA	Registration Area
RB	Resource Block
RE	Resource Element
<i>Reading</i>	Leyendo
<i>Registration Area</i>	Área de Registro
RACH	Random Access Channel
RAI	RAN Area Identifier
RAN	Radio Access Network
RAN Area	Área RAN
RANAC	RAN Area Code
RD	Real Decreto
Rec. M.2083-0	ITU-R Recommendation M.2083-0
<i>Release</i>	Lanzamiento
RI	Rank Indicator
RLC	Radio Link Control
RMS	Root Mean Square
RNTI	Radio Network Temporary Identifier
RRC	Radio Resource Control
RRC_CONNECTED	Estado RRC Conectado
RRC_IDLE	Estado RRC Ocioso
RRC_INACTIVE	Estado RRC Inactivo
SA	Standalone
SAR	Specific Energy Absorption Rate
<i>Scheduling</i>	Planificación
Scheduler	Planificador
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
SDL	Supplementary Downlink
<i>Searching</i>	Buscando
SIM	Subscriber Identity Module
SINR	Signal to Interference-Noise Ratio
<i>Slot</i>	Espacio
<i>Small Cells</i>	Células pequeñas

Smart City	Ciudad inteligente
SRS	Sounding Reference Signals
SS/PBCH	Sincronization Signal / PBCH Block
SSS	Secondary Sincronization Signal
SUL	Supplementary Uplink
<i>Subframes</i>	Subtrama
SU-MIMO	Single-User MIMO
TA	Tracking Area
TAC	Tracking Area Code
TAI	Tracking Area Identifier
TDD	Time-Division Duplex
<i>Tracking Area</i>	Área de seguimiento
TRS	Tracking Reference Signal
TTI	Transmission Time Interval
UCI	Uplink Control Information
UE	User Equipment (Terminal Móvil 5G)
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UPF	User Plane Function
<i>User Plane</i>	Plano de usuario
<i>uRLLC</i>	ultra Reliable Low Latency Communications
<i>Waiting</i>	Buscando
WCDMA	Wideband Code-Division Multiple Access
<i>Wideband</i>	Banda ancha
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Wireless Max
WRC	World Radiocommunications Conference

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las telecomunicaciones móviles han experimentado grandes cambios y una gran evolución. Este tipo de comunicaciones comenzó en la década de los ochenta con el desarrollo de redes completamente analógicas, comúnmente conocidas como redes de primera generación.

No fue hasta la década de los noventa, cuando se desarrollaron las primeras comunicaciones móviles digitales. Estas redes de segunda generación llegarían a Europa de la mano de GSM, desarrollada en su día por la CEPT, y que más tarde pasaría a dominio de la ETSI. GSM y sus futuras evoluciones fueron sin duda la tecnología de segunda generación más empleada del planeta.

Más tarde se formaría 3GPP, una organización internacional, encargada de desarrollar las redes de tercera generación. El principal objetivo de esta organización era crear un estándar global que facilitase el desarrollo y la compatibilidad de los terminales a escala mundial. 3GPP estaría formada por empresas y organismos de todo el planeta. Aparecieron también otras entidades, pero no tuvieron el mismo éxito, por lo que acabaron desapareciendo con el paso de los años.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) es la encargada de regular el espectro y las tecnologías empleadas en cada banda. Por tanto, para que una tecnología sea catalogada como estándar, esta debe cumplir con los requisitos fijados por dicha organización.

A finales del siglo XX, la ITU establece los objetivos que deben cumplir las redes de 3ª generación. Finalmente, la ITU publicó el estándar de comunicaciones móviles 3G IMT-2000, en el cual se aprobaron diversas tecnologías, entre las cuales se encontraría WCDMA/HSPA, propuesta por 3GPP, y que fue sin lugar a duda la tecnología más extendida.

En el año 2010 surgieron las comunicaciones de cuarta generación, tras la publicación del estándar IMT-Advanced, donde tecnologías como LTE Advanced (propuesta por 3GPP) y WiMAX fueron certificadas.

Tras más de diez años de despliegue y coexistencia entre redes de segunda, tercera y cuarta generación, la ITU publica en febrero de 2021 el estándar 5G IMT-2020, en donde NR, la nueva tecnología de acceso radio propuesta por 3GPP, fue aprobada. Dicha tecnología será materia de estudio durante el presente trabajo.

1.2.OBJETIVOS

El nuevo estándar 5G NR habilita el uso de nuevos servicios que eran impracticables previamente con la tecnología antecesora LTE Advanced. Por ello, el principal objetivo del trabajo será evaluar las prestaciones que ofrece el estándar 5G NR sobre dichos servicios. Para ello, se desarrollará una herramienta de simulación que permita emular la estructura de tramas utilizadas por la RAN (Red de Acceso Radio).

Se analizará con detalle la asignación de recursos radio (recursos frecuenciales, temporales y espaciales) haciendo especial hincapié en las capas MAC (Control de acceso al medio) y PHY (Física). Ante la elevada complejidad de la red, se tratarán como caja negra el propio núcleo de red y los niveles superiores de la RAN.

En el simulador se podrán seleccionar diversos escenarios, con múltiples servicios. El desarrollo de dicho simulador se realizará íntegramente en el lenguaje de programación Python3.

Se han puesto a prueba dos microcélulas 5G en entornos urbano e industrial. En dichos escenarios habrá dispositivos de baja latencia, banda ancha e incluso bajo consumo. Se analizarán las prestaciones de la estación base y de los propios terminales, tales como la velocidad binaria, latencia potencia, atenuación, modulación empleada, etc.

Finalmente, tras analizar los resultados obtenidos en la simulación, evaluaremos si las prestaciones ofrecidas por NR son suficientes para proporcionar estos nuevos servicios.

1.3.ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El trabajo estará estructurado en múltiples fases. En primer lugar, se hará una descripción teórica de *New Radio*, tecnología incorporada en el estándar de 5ª generación o IMT-2020.

A continuación, se describirá la arquitectura del simulador 5G, explicándolo en profundidad. Seguidamente, se presentarán los resultados obtenidos de simular varios entornos. Finalmente, se sacarán diversas conclusiones de los resultados obtenidos, entrando en detalle en posibles mejoras.

En las últimas páginas aparecen dos anexos correspondientes a aspectos éticos, económicos, sociales y ambientales, además de un presupuesto económico del proyecto.

2. SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES 5G

2.1.FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.1. VISIÓN Y CASOS DE USO DE 5G

Cada cuatro años se realizan conferencias internacionales o comúnmente conocidos como WRC (*World Radiocommunication Conference*), en donde los operadores, fabricantes de equipos y otras organizaciones ofrecen su visión, con el objetivo de actualizar las regulaciones radio o iniciar procesos de estandarización.

En 2015, tras la realización del WRC-15, se observan diversas tendencias. Por ello, ese mismo año, el ITU-R, basándose en las visiones ofrecidas en el WRC-15, publica la Rec. M.2083-0, en donde se define una lista de requisitos que deben cumplir las tecnologías de 5ª generación para ser catalogadas como estándar IMT-2020.

Entre las tendencias más presentes en el WRC-15 se encontrarían los servicios de baja latencia y alta fiabilidad, las comunicaciones máquina-máquina, alta densidad de dispositivos, eficiencia energética y bajo consumo, posicionamiento preciso, etc. Finalmente, en la Rec. M.2083-0, el ITU-R definió tres grandes escenarios de uso junto con sus requerimientos tecnológicos, entre los que se encontrarían la Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB), las Comunicaciones ultra Fiables y de Baja Latencia (uRLLC) y Comunicaciones masivas de Tipo Máquina (mMTC).

Dentro de la Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB) es necesario garantizar 100 Mbps, ahorro de energía cien veces superior a 4G, alcanzar tasas binarias pico de 20 Gbps y alta movilidad con velocidades cercanas a 500 km/h. Por otro lado, en las Comunicaciones ultra Fiables y de Baja Latencia (uRLLC) se requiere una fiabilidad del 99.9999 %, latencias inferiores al milisegundo, amplia movilidad y tasas binarias medias de 25 Mbps. Por último, las Comunicaciones masivas de Tipo Máquina (mMTC) precisarán de igual manera de bajo consumo energético, acceso asíncrono, bajo coste, bajas tasas binarias (100 kbps) y gran densidad de dispositivos conectados ($10^6/\text{km}^2$).

En la Fig. 2.1 podemos observar los principales servicios a los que atenderá 5G, clasificados dentro de su respectivo escenario de uso.

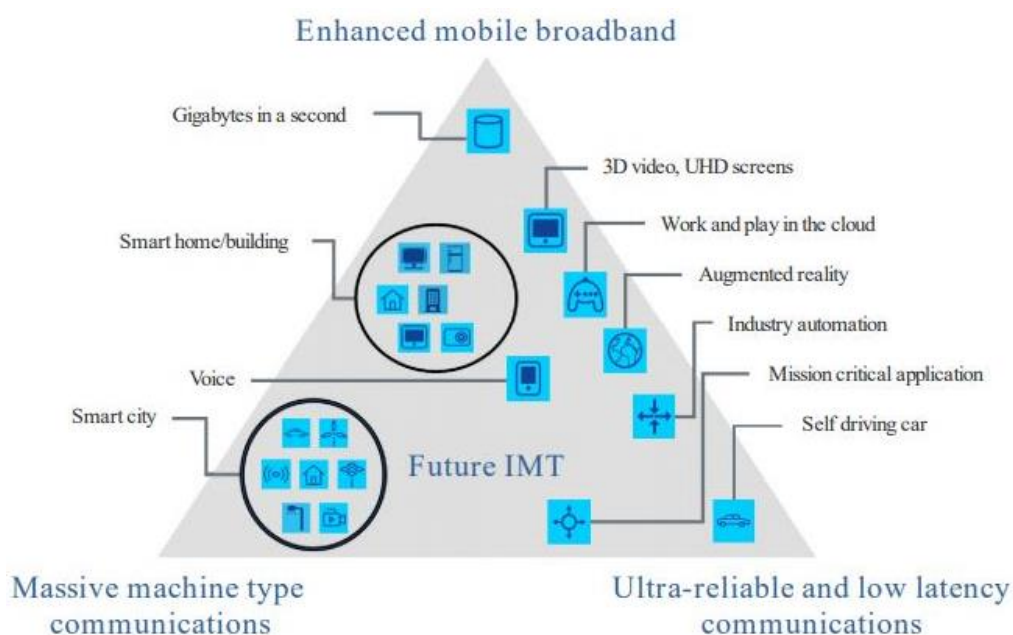


FIGURA 2.1 - Escenarios de uso IMT-2020 [1]

Por otro lado, en la Fig. 2.2, encontramos las prestaciones que debe conseguir cada escenario de uso con su respectiva escala de importancia.

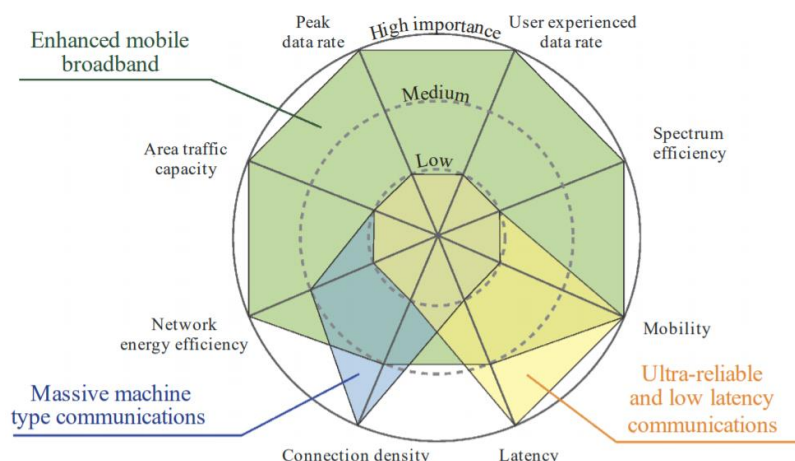


FIGURA 2.2 - Prestaciones de cada escenario de uso IMT-2020 [1]

Finalmente, en la Fig. 2.3, se muestran las prestaciones mínimas que el estándar 5G IMT-2020 debe conseguir para cumplir con las visiones fijadas en las Recomendaciones del ITU-R. También se encuentra comparada con su tecnología antecesora IMT-Advanced.

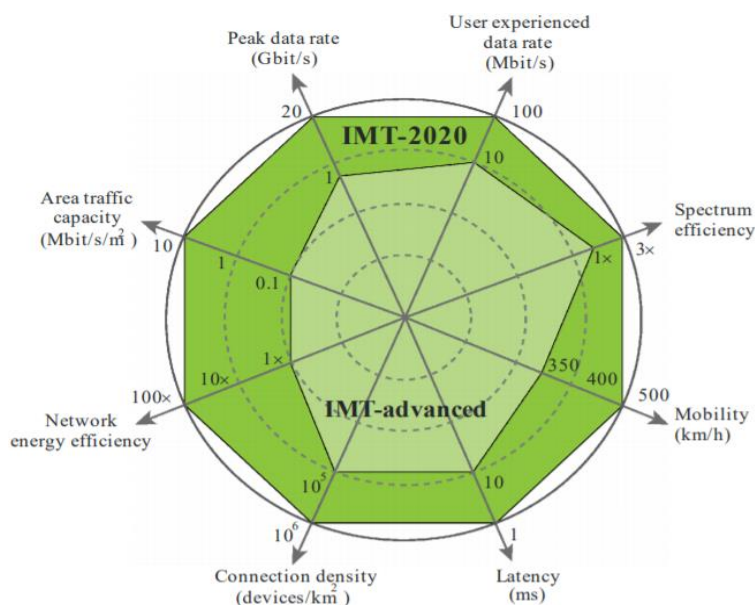


FIGURA 2.3 - Prestaciones IMT-2020 [1]

Tras la publicación Rec. M.2083-0, los fabricantes, operadores y organismos más trascendentales, agrupados en 3GPP, comienzan a desarrollar conjuntamente una nueva tecnología que cumpla con los objetivos marcados por el ITU-R. A finales de 2018, 3GPP publica la *Release 15*, en la cual se presenta la nueva Red de Acceso Radio 5G NR y algunas mejoras del sistema LTE. En 2020, tras la publicación de la *Release 16*, se estrena finalmente el núcleo de red 5GCN y se añaden mejoras adicionales a la interfaz radio.

Finalmente, en febrero de 2021, el ITU-R aprueba la tecnología 5G-NR, incorporándola así al estándar de 5ª generación o formalmente conocido como IMT-2020.

NR es capaz de conseguir increíbles prestaciones gracias a la combinación de complejas técnicas, entre las cuales encontramos la agregación de portadoras, modulaciones y codificaciones de canal con mayor eficiencia espectral, densificación de red con *small-cells*, técnicas MIMO, nuevas bandas de frecuencia (ondas milimétricas o *mmWave*), etc.

2.1.2. ARQUITECTURA DE RED

El núcleo de red 5GCN incluye diversas mejoras frente al núcleo de cuarta generación (EPC). No obstante, NR podrá conectarse también a EPC para facilitar la integración progresiva de los sistemas de 5ª generación.

En la Fig. 2.4 podemos observar la arquitectura de red 5G. La red de acceso radio NR posee una arquitectura plana de nivel único formada por la estación base o gNB. La estación base puede dividirse a su vez en una única unidad central o gNB-CU y diversas unidades remotas o gNB-DUs. La unidad central se encargará de procesar las capas altas mientras que las unidades remotas las capas bajas de la pila de protocolos radio (RLC, MAC, PHY).

Con el fin de gestionar traspasos y posibles comunicaciones multicelulares encontramos una interfaz de comunicación entre estaciones base. Esta interfaz permite mejorar la coordinación entre gNBs y aumentar así la capacidad de los terminales móviles.

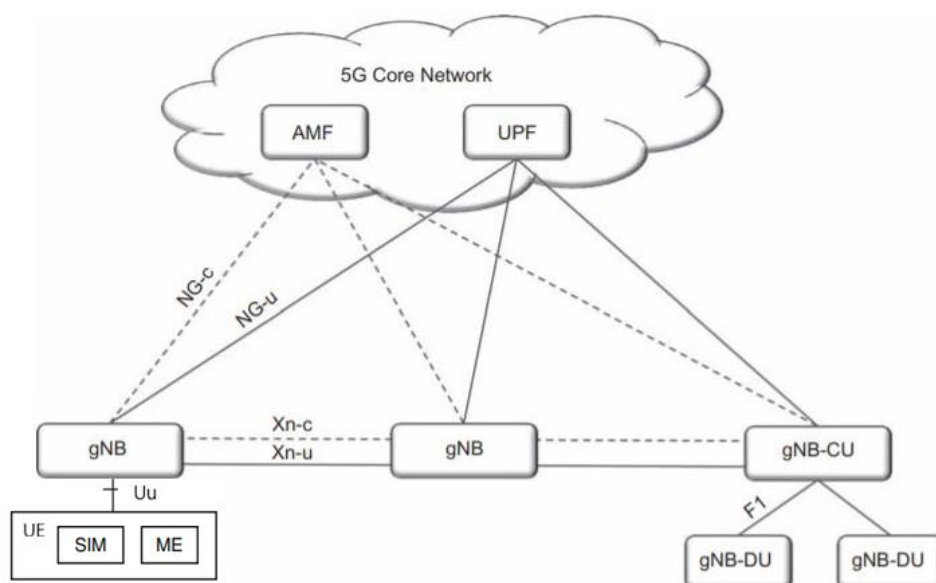


FIGURA 2.4 - Arquitectura de red 5G [2]

En la Fig. 2.5 podemos distinguir dos planos o funcionalidades diferentes en el núcleo de red:

- Plano de usuario o UPF (*User Plane Function*): encargado de gestionar la conmutación y conexión con otras redes.
- Plano de control o AMF (*Access and Mobility Management Function*): realiza funciones de movilidad y seguridad de la red 5G.

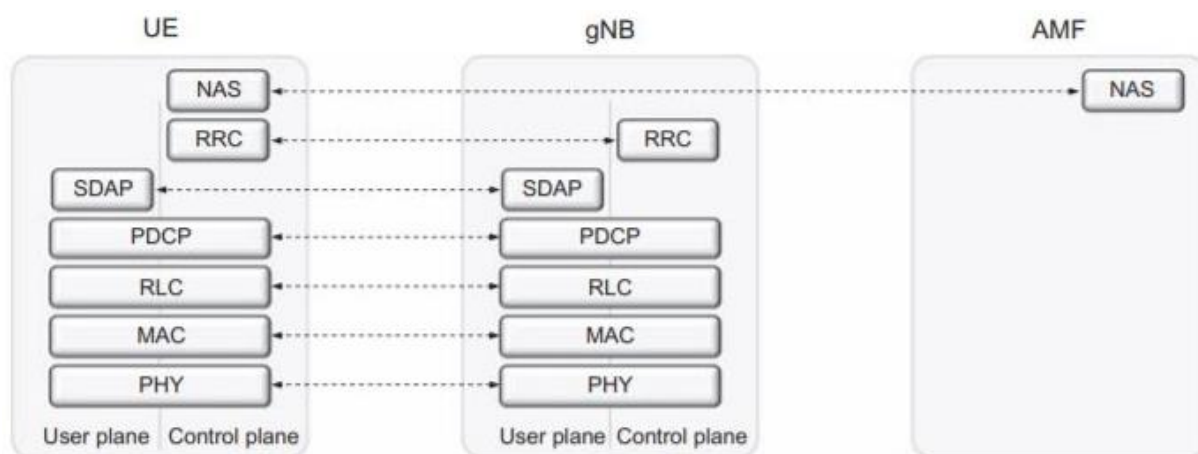


FIGURA 2.5 - Pila de protocolos de 5G [2]

5GCN ofrece la posibilidad de realizar *Edge Computing*, permitiendo trasladar el procesamiento de red cerca del usuario, reduciendo así su retardo. Además, los núcleos de red podrán estar virtualizados, orientado a proveer múltiples servicios (*Network Slicing*) sobre los mismos equipos físicos.

En 5G, en la Fig. 2.6, encontramos tres niveles de localización: a nivel de célula, *RAN Area* y *Tracking Area*. Los terminales se moverán y deberán de notificar a la red cuando cambien de localización. Estas actualizaciones dependerán del estado de conexión del terminal. Además, para evitar elevadas actualizaciones y generar congestiones surgen las Tracking Areas, que permiten crear una pequeña histéresis a la hora de actualizar la posición.

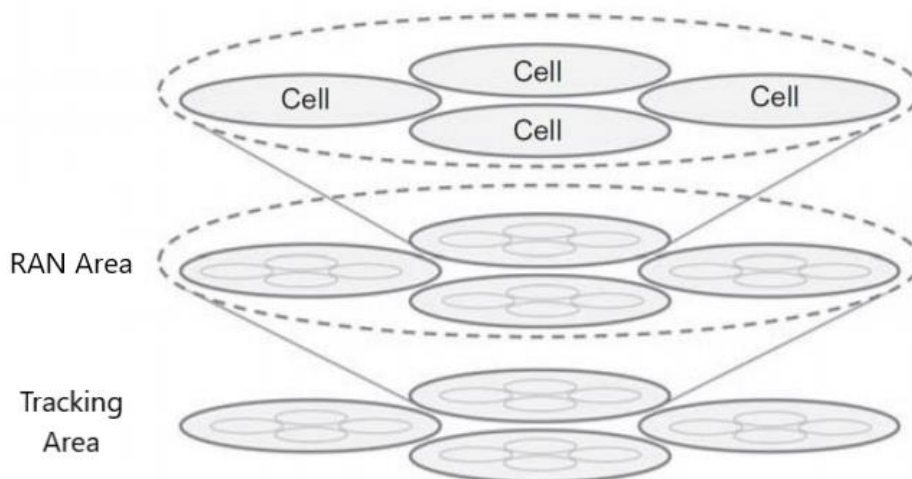


FIGURA 2.6 - Áreas de localización en 5G [2]

Las Tracking Areas se identifican globalmente por su TAI. De igual manera, las células y RAN Areas con su NCGI o RAI respectivamente. Podemos observar la estructura de dichos identificadores en la Fig. 2.7. El MCC y MNC son los identificadores de país y operador.

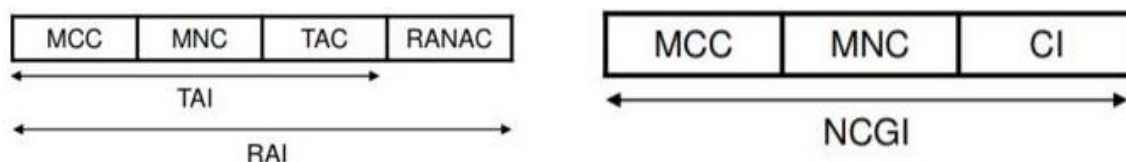


FIGURA 2.7 - Identificadores de red 5G [5]

El terminal móvil o UE está compuesto por el propio equipamiento de terminal (ME) y la tarjeta SIM. La SIM se encarga de realizar las funciones de seguridad, encriptación e identificación. Los terminales poseerán diversos identificadores entre los cuales se encuentran:

- IMSI: Identificador Internacional de Móvil Subscrito.
- IMEI: Identificador Internacional de Equipamiento Móvil.
- MSISDN: Número de teléfono del usuario dentro de la red telefónica.
- RNTI: Identificador Temporal de la Red Radio
- 5G-GUTI: Identificador Temporal Global y Único de 5G, visible en la Fig. 2.8.

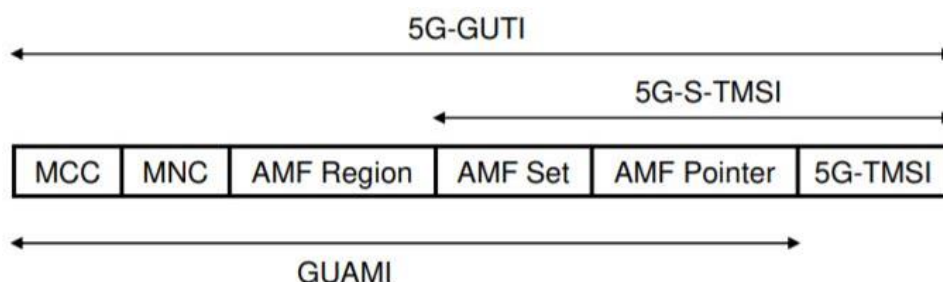


FIGURA 2.8 - Identidad de usuario 5G [5]

Como hemos mencionado anteriormente, NR puede conectarse al núcleo de red 4G e incluso coordinarse con las propias células LTE o eNBs. Si NR necesita de una célula LTE para gestionar el plano de control el despliegue se le denominará NSA o Non Standalone. Por el contrario, si NR maneja el plano de control y plano de usuario simultáneamente se denominará SA o Standalone.

En la Fig. 2.9 podemos apreciar diferentes tipologías de Red de Acceso Radio dependiendo del conexionado. El plano de control se encuentra caracterizado por la letra *c* mientras que el plano de usuario por la letra *u*.

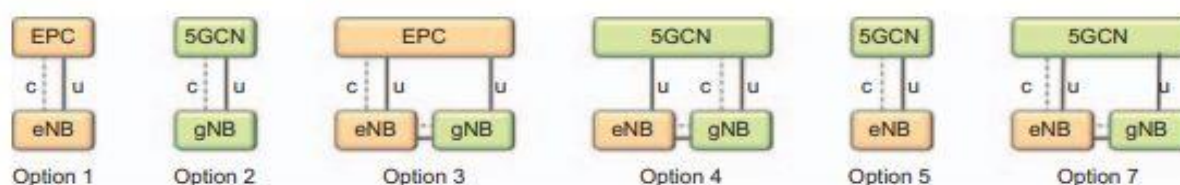


FIGURA 2.9 - Tipologías de Red de Acceso Radio [2]

2.1.3. INTERFAZ RADIO

El ITU-R es la encargada de definir en qué frecuencias es posible desplegar el estándar de 5ª generación. Para ello el ITU-R acuerda con múltiples países bandas de uso global. Gracias a estos acuerdos es posible realizar economía de escala y facilitar la compatibilidad de dispositivos entre distintos países. Las principales frecuencias de interés para comunicaciones móviles se pueden clasificar en tres tipos:

- Baja frecuencia: frecuencias inferiores a 900 MHz.
- Frecuencia media: frecuencias en el rango de 1800 MHz a 3500 MHz.
- Alta frecuencia: frecuencias superiores a 3500 MHz

Más tarde, en la *Release* 15, 3GPP definió dos rangos de frecuencia:

- FR1: frecuencias inferiores a 6 GHz
- FR2: frecuencias en el rango de 24.25 a 52.6 GHz, comúnmente conocidas como *mmWave*.

Dentro de estos rangos, encontramos múltiples bandas de frecuencia que se encuentran numeradas en función de su posición en el espectro.

Las bandas de frecuencia están a su vez clasificadas en emparejadas o no emparejadas. Dentro de las emparejadas encontramos las bandas de multiplexación en frecuencia o FDD, donde cada banda ascendente se encuentra asociada con su respectiva banda descendente.

Dentro de las bandas no emparejadas encontramos las bandas de multiplexación en el tiempo o TDD, en donde dicha banda puede ser compartida simultáneamente para enlace ascendente y descendente. Además, dentro de las bandas no emparejadas encontramos también las bandas SUL y SDL, o comúnmente conocidas como bandas suplementarias ascendente o descendente respectivamente, que nos permiten aumentar la capacidad en uno de los sentidos de la comunicación.

En las figuras Tabla. 2.1, Tabla. 2.2, Tabla. 2.3 y Tabla. 2.4 se presentan las distintas bandas disponibles en cada rango de frecuencia FR1 y FR2, definidas tras la Release 15 de 3GPP.

TABLA 2.1 - Bandas de frecuencia TDD en FR1 [3]

5G NR Band	Uplink / Downlink Frequency	Bandwidth
n34	2010 - 2025 MHz	15 MHz
n38	2570 - 2620 MHz	50 MHz
n39	1880 - 1920 MHz	40 MHz
n40	2300 - 2400 MHz	100 MHz
n41	2469 - 2690 MHz	194 MHz
n48	3550 - 3700 MHz	150 MHz
n50	1431 - 1517 MHz	85 MHz
n51	1427 - 1432 MHz	5 MHz
n77	3300 - 4200 MHz	900 MHz
n78	3300 - 3800 MHz	500 MHz
n79	4400 - 5000 MHz	600 MHz
n90	2496 - 2690 MHz	194 MHz

TABLA 2.2 - Bandas de frecuencia FDD en FR1 [3]

5G NR Band	Uplink Frequency	Downlink Frequency	Bandwidth
n1	1920 - 1989 MHz	2110 - 2170 MHz	60 MHz
n2	1850 - 1910 MHz	1930 - 1990 MHz	60 MHz
n3	1710 - 1785 MHz	1805 - 1880 MHz	75 MHz
n5	824 - 849 MHz	869 - 894 MHz	25 MHz
n7	2500 - 2670 MHz	2620 - 2690 MHz	70 MHz
n8	880 - 915 MHz	925 - 960 MHz	35 MHz
n12	699 - 716 MHz	729 - 746 MHz	17 MHz
n14	788 - 798 MHz	758 - 768 MHz	20 MHz
n18	815 - 830 MHz	860 - 875 MHz	15 MHz
n20	832 - 862 MHz	791 - 821 MHz	30 MHz
n25	1850 - 1915 MHz	1930 - 1995 MHz	65 MHz
n28	703 - 748 MHz	758 - 803 MHz	45 MHz
n30	2305 - 2315 MHz	2350 - 2360 MHz	10 MHz
n65	1920 - 2010 MHz	2110 - 2200 MHz	90 MHz
n66	1710 - 1780 MHz	2110 - 2200 MHz	90 MHz
n70	1695 - 1710 MHz	1995 - 2020 MHz	15/25 MHz
n71	663 - 698 MHz	617 - 652 MHz	35 MHz
n74	1427 - 1470 MHz	1475 - 1518 MHz	43 MHz
n91	832 - 862 MHz	1427 - 1432 MHz	-
n92	832 - 862 MHz	1432 - 1517 MHz	-
n93	880 - 915 MHz	1427 - 1432 MHz	-
n94	880 - 915 MHz	1432 - 1517 MHz	-

TABLA 2.3 - Bandas de frecuencia SUL y SDL en FR1 [3]

5G NR Band	Uplink Frequency	Downlink Frequency	Bandwidth	Type
n29	-	717 - 728 MHz	11 MHz	SDL
n75	-	1432 - 1517 MHz	85 MHz	SDL
n76	-	1427 - 1432 MHz	5 MHz	SDL
n80	1710 - 1785 MHz	-	75 MHz	SUL
n81	880 - 915 MHz	-	35 MHz	SUL
n82	832 - 862 MHz	-	30 MHz	SUL
n83	703 - 748 MHz	-	45 MHz	SUL
n84	1920 - 1980 MHz	-	60 MHz	SUL
n86	1710 - 1780 MHz	-	70 MHz	SUL
n89	824 - 849 MHz	-	25 MHz	SUL
n95	2010 - 2025 MHz	-	15 MHz	SUL

TABLA 2.4 - Bandas de frecuencia TDD en FR2 [3]

5G NR Band	Band Alias	Uplink / Downlink Band	Bandwidth	Type
n257	28 GHz	26.5 - 29.5 GHz	3 GHz	TDD
n258	26 GHz	24.250 - 27.5 GHz	3.250 GHz	TDD
n259	-	39.5 - 43.5 GHz	4 GHz	TDD
n260	39 GHz	37 - 40 GHz	3 GHz	TDD
n261	28 GHz	27.5 - 28.35 GHz	850 MHz	TDD

NR incorpora nuevas bandas de frecuencia, concretamente las bandas milimétricas o *mmWave* situadas en FR2. Estas bandas poseen gran cantidad de espectro por lo que servirán para aumentar la granularidad de la red e incrementar la densidad de dispositivos conectados. Estas bandas poseen mucha atenuación debido a la interacción con los gases atmosféricos, por lo que su principal aplicación serán células de corto alcance o *small cells*.

En la Fig. 2.10 se muestra la atenuación producida por la absorción de los gases atmosféricos, teniendo un pico máximo en 63 GHz.

Asimismo, existe la posibilidad de transmitir en bandas de frecuencia sin licencia, como la banda WiFi. Siempre empleando un mecanismo de escucha (*listen-before-talk*) antes de transmitir, para garantizar que la banda no está siendo usada por alguno de estos servicios.

Además, NR ofrece una gran flexibilidad en el reparto de recursos radio que veremos más adelante y favorecerá la compatibilidad a posteriori de futuras evoluciones.

NR reduce las señales *always-on* utilizadas en LTE para sondeo de canal u otros fines, con fin de minimizar el consumo energético de los dispositivos, alargar el uso de las baterías y reducir la interferencia entre células.

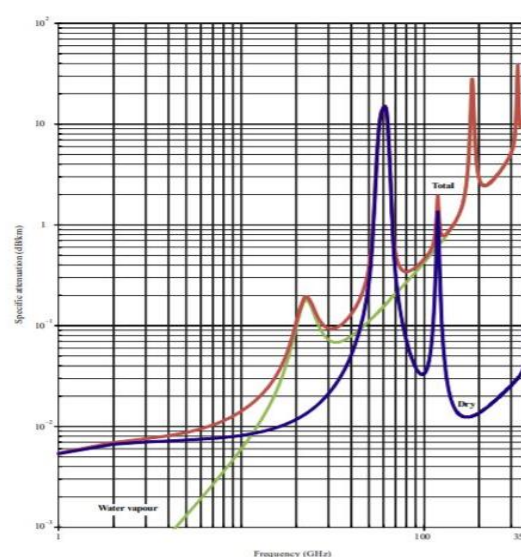


FIGURA 2.10 - Atenuación atmosférica [7]

Al igual que en LTE, la modulación empleada será OFDM. En donde cada recurso frecuencial no interfiere con los demás gracias a la ortogonalidad entre subportadoras. Por tanto, podemos representar en la Fig. 2.11 los recursos físicos como una rejilla tiempo-frecuencia, en donde cada recuadro corresponderá a un símbolo de una subportadora.

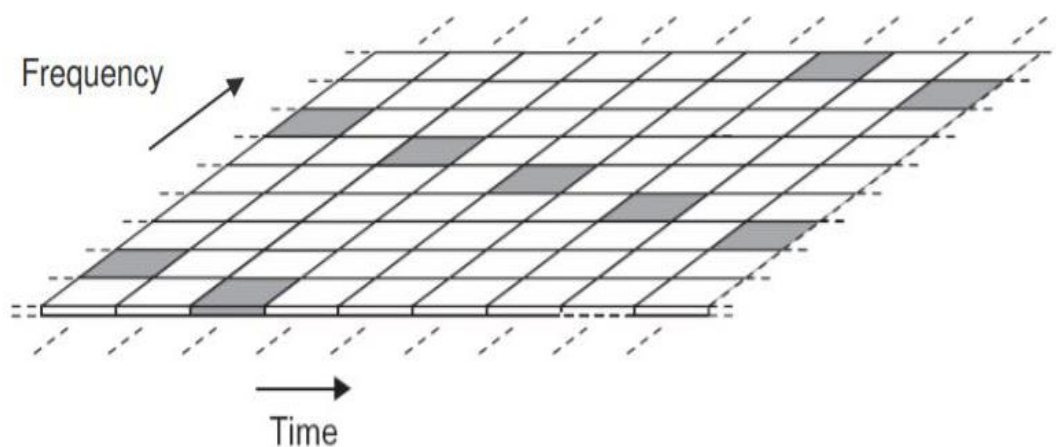


FIGURA 2.11 - Rejilla de recursos OFDM [5]

A estos recuadros se les denominan recursos elementales o RE. Por otro lado, se le denominará bloque de recursos o RB al conjunto de doce subportadoras. En la Fig. 2.12 se encuentran representados dichos recursos.

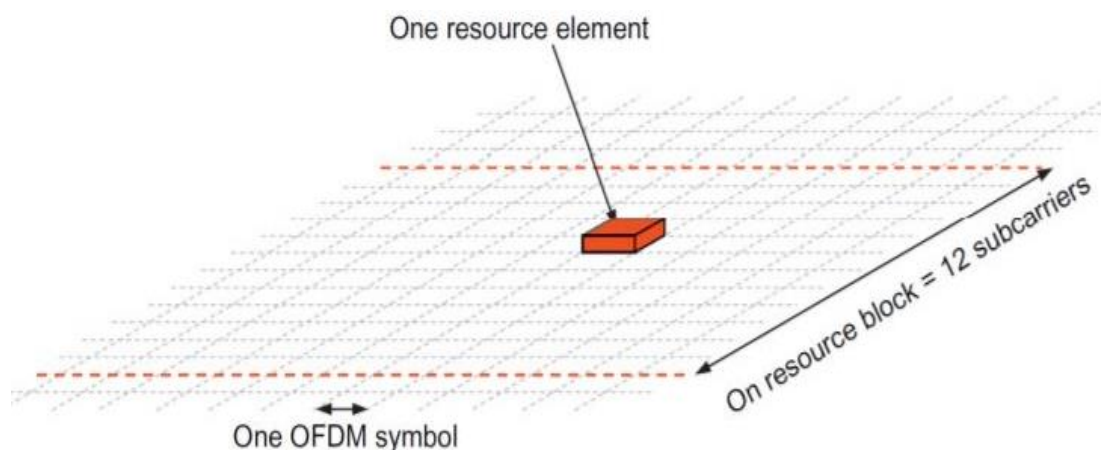


FIGURA 2.12 - Rejilla de recursos en NR [2]

Cada subportadora estará modulada a su vez con QPSK, 16-QAM, 64-QAM o 256-QAM dependiendo de la calidad de canal o SINR medida.

En sentido ascendente es posible utilizar DFT-S-OFDM con modulación $\pi/2$ -BPSK. Este tipo de precodificación permite reducir la PAPR tan elevada que puede llegar a producir OFDM en el terminal móvil haciendo más costoso su diseño. Este tipo de precodificación es especialmente útil en dispositivos de bajo costo.

La separación entre subportadoras OFDM es variable, permitiendo una gran flexibilidad a la hora de asignar recursos sobre distintos escenarios.

La estructura temporal está organizada en tramas o *frames* de 10 ms, a su vez divididos en 10 subtramas o *subframes*. La unidad asignable más pequeña son los *slots*, que dependiendo de la distancia entre subportadoras o numerología aplicada cabrán más o menos en cada subtrama radio. También es posible la transmisión de medio *slot* para reducir aún más la latencia.

En la Fig. 2.13 se puede apreciar una representación gráfica de las diferentes numerologías disponibles.

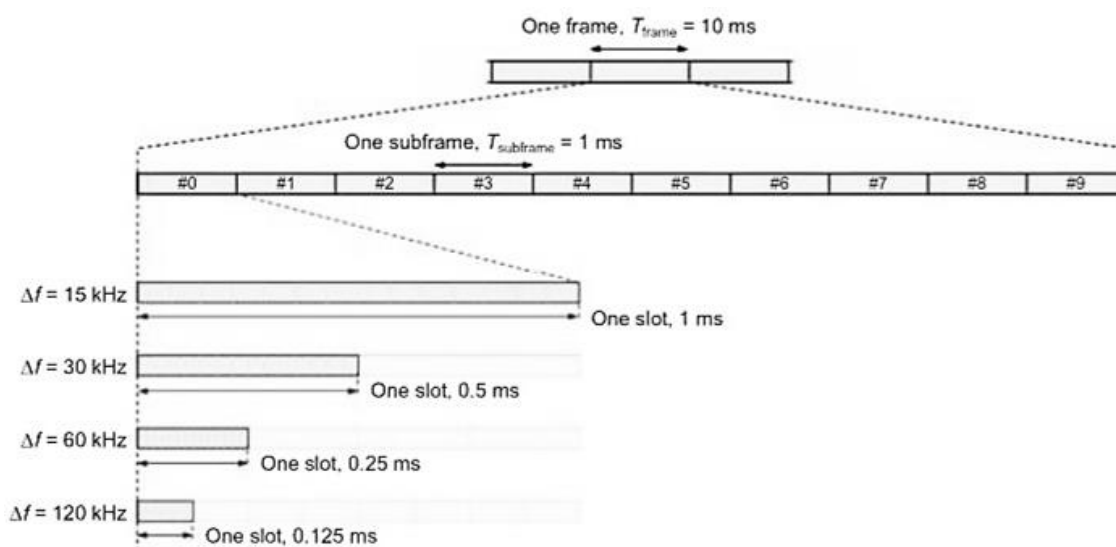


FIGURA 2.13 - Estructura temporal en NR [6]

Cada slot está compuesto generalmente por 14 símbolos OFDM. Los símbolos tendrán un prefijo cíclico que permitirá absorber los ecos de canal y posibles errores en la corrección de avance temporal, manteniendo así la ortogonalidad entre subportadoras. Además, es posible aplicar un prefijo cíclico extendido para algunas aplicaciones y en configuraciones concreta, en cuyo caso el número de símbolos por slot sería de 12. En la [Tabla. 2.5](#) encontramos una tabla con las distintas numerologías aplicables en NR.

TABLA 2.5 - Numerologías disponibles en NR [7]

μ	Subcarrier separation $\Delta f = 2^\mu \cdot 15 [\text{kHz}]$	Cyclic Prefix	Slots per frame	Slots per subframe	Symbols per slot
0	15	Normal	10	1	14
1	30	Normal	20	2	14
2	60	Normal	40	4	14
2	60	Extended	40	4	12
3	120	Normal	80	8	14
4	240	Normal	160	16	14

μ	SCS (kHz)	Useful time (μs) $T_u (1/\text{SCS})$	Cyclic prefix T_{CP} (μs)		Symbol duration T_s (μs)		Simbols per slot	Slot (μs)
			s0	Resto	s0	Resto		
0	15	66,67	5,21	4,69	71,87	71,35	14	1000
1	30	33,33	2,86	2,34	36,2	35,67	14	500
2	60	16,67	1,69	1,17	18,36	17,84	14	250
2	60	16,67	4,2		20,83		12	250
3	120	8,33	1,11	0,59	9,44	8,92	14	125
4	240	4,17	0,81	0,29	4,98	4,46	14	62,5

Dependiendo del rango de frecuencia en el que nos encontremos podremos aplicar una numerología u otra. En la [Tabla. 2.6](#) podemos apreciar las diferentes numerologías y su disponibilidad en cada rango de frecuencia. Cada portadora es capaz de albergar un máximo de 275 bloques de recursos, limitando por tanto el ancho de la portadora radio.

Por último, la separación de 240 kHz tan sólo es aplicable en el bloque SS/PBCH que alberga al canal físico PBCH y a las señales de sincronización (PSS, SSS) que veremos más adelante.

TABLA 2.6 - Numerologías disponibles en cada rango de frecuencias [5]

Prefijo cíclico normal					
Δf	$T_{\text{slot}}/T_{\text{subfr}}$	FR1	FR2	CP normal	BW máx.
15 kHz	1	✓	–	$\approx 4.69 \mu\text{s}$	50 MHz
30 kHz	2	✓	–	$\approx 2.34 \mu\text{s}$	100 MHz
60 kHz	4	✓	✓	$\approx 1.17 \mu\text{s}$	200 MHz
120 kHz	8	–	✓	$\approx 0.59 \mu\text{s}$	400 MHz
240 kHz	16	–	✓	$\approx 0.29 \mu\text{s}$	–

Prefijo cíclico extendido					
Δf	$T_{\text{slot}}/T_{\text{sf}}$	FR1	FR2	CP extendido	BW máx.
60 kHz	4	✓	✓	$\approx 4.17 \mu\text{s}$	200 MHz

A la hora de seleccionar la separación entre subportadoras debemos tener en cuenta múltiples factores como la dispersión de retardo, la dispersión Doppler, la frecuencia de trabajo y el retardo máximo permitido. Por tanto, dependiendo del escenario usaremos una numerología u otra.

En la [Fig. 2.14](#) encontramos los diferentes bloques empleados en la capa física de NR.

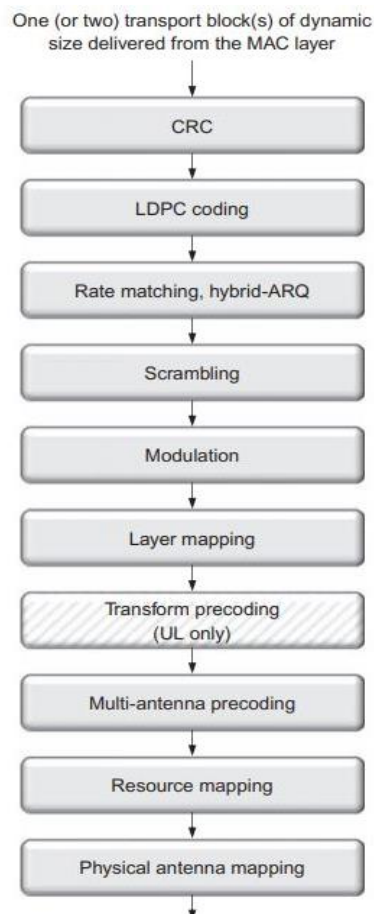


FIGURA 2.14 - Capa física [2]

En primer lugar, la capa MAC suministrará a la capa física uno o dos bloques de transporte. Estos bloques pasarán primero por el bloque de codificación de canal. Estos serán codificados con un código corrector CRC de 16 o 24 bits. Seguidamente se le aplicará un código polar o LDPC para corregir posibles errores de canal.

Más tarde, se adapta la tasa binaria de fuente, eliminando bits o añadiendo redundancia, para ajustarse a la tasa binaria ofrecida por el canal. Esta etapa se combina con la etapa de H-ARQ con retransmisión de redundancia incremental.

A continuación, el bloque de transporte pasa por una etapa de aleatorización. Seguidamente, se le aplica una modulación. Las modulaciones disponibles son QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM e incluso $\pi/2$ -BPSK como hemos mencionado anteriormente.

La modulación y codificación seleccionada dependerá exclusivamente del estado del canal radio. Por tanto, para adaptar la tasa binaria en *downlink* el móvil deberá realimentar información del canal. En el caso ascendente la base puede estimar el estado de canal a partir de señales de sondeo enviadas por el terminal, o bien si existiese reciprocidad la base podría utilizar la información del enlace descendente. Esta reciprocidad solo es posible en bandas TDD.

Se realimentará el parámetro CQI que representa la SINR de canal. Existen 15 posibles valores de CQI. Aparecen tres tablas diferentes de las cuales se seleccionará una de ellas dependiendo de la categoría de terminal o servicio a ofrecer. El CQI realimentado será el más alto de la tabla cuya BLER en primera transmisión no supere el 10%. Sin embargo, la Tabla 3 está diseñada para servicios de baja latencia y ultra fiables (uRLLC), por tanto, su valor será mucho más conservador, no superando el 0.001% de errores bloque.

En la [Tabla. 2.7](#), [Tabla. 2.8](#) y [Tabla. 2.9](#) podemos apreciar los diferentes valores de CQI disponibles en NR.

TABLA 2.7 - Tabla 1 CQI [3]

CQI index	modulation	code rate x 1024	efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

TABLA 2.8 - Tabla 2 CQI [3]

CQI index	modulation	code rate x 1024	efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	193	0.3770
3	QPSK	449	0.8770
4	16QAM	378	1.4766
5	16QAM	490	1.9141
6	16QAM	616	2.4063
7	64QAM	466	2.7305
8	64QAM	567	3.3223
9	64QAM	666	3.9023
10	64QAM	772	4.5234
11	64QAM	873	5.1152
12	256QAM	711	5.5547
13	256QAM	797	6.2266
14	256QAM	885	6.9141
15	256QAM	948	7.4063

TABLA 2.9 - Tabla 3 CQI [3]

CQI index	modulation	code rate x 1024	efficiency
0	out of range		
1	QPSK	30	0.0586
2	QPSK	50	0.0977
3	QPSK	78	0.1523
4	QPSK	120	0.2344
5	QPSK	193	0.3770
6	QPSK	308	0.6016
7	QPSK	449	0.8770
8	QPSK	602	1.1758
9	16QAM	378	1.4766
10	16QAM	490	1.9141
11	16QAM	616	2.4063
12	64QAM	466	2.7305
13	64QAM	567	3.3223
14	64QAM	666	3.9023
15	64QAM	772	4.5234

Una vez enviado el CQI se seleccionará una modulación y código concretas. Hay 32 valores MCS (Modulation Code Scheme) disponibles estando reservados los últimos para posibles retransmisiones. El número de MCS es mayor al número CQI permitiendo realizar un ajuste más fino. En la [Tabla. 2.10](#), [Tabla. 2.11](#) y [Tabla. 2.12](#) se aprecian los distintos valores de MCS disponibles.

TABLA 2.10 - Tabla 1 MCS [3]

MCS Index <i>I_{MCS}</i>	Modulation Order <i>Q_m</i>	Target code Rate <i>R</i> x [1024]	Spectral efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	157	0.3066
2	2	193	0.3770
3	2	251	0.4902
4	2	308	0.6016
5	2	379	0.7402
6	2	449	0.8770
7	2	526	1.0273
8	2	602	1.1758
9	2	679	1.3262
10	4	340	1.3281
11	4	378	1.4766
12	4	434	1.6953
13	4	490	1.9141
14	4	553	2.1602
15	4	616	2.4063
16	4	658	2.5703
17	6	438	2.5664
18	6	466	2.7305
19	6	517	3.0293
20	6	567	3.3223
21	6	616	3.6094
22	6	666	3.9023
23	6	719	4.2129
24	6	772	4.5234
25	6	822	4.8164
26	6	873	5.1152
27	6	910	5.3320
28	6	948	5.5547
29	2	reserved	
30	4	reserved	
31	6	reserved	

TABLA 2.11 - Tabla 2 MCS [3]

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	Target code Rate $R \times [1024]$	Spectral efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	193	0.3770
2	2	308	0.6016
3	2	449	0.8770
4	2	602	1.1758
5	4	378	1.4766
6	4	434	1.6953
7	4	490	1.9141
8	4	553	2.1602
9	4	616	2.4063
10	4	658	2.5703
11	6	466	2.7305
12	6	517	3.0293
13	6	567	3.3223
14	6	616	3.6094
15	6	666	3.9023
16	6	719	4.2129
17	6	772	4.5234
18	6	822	4.8164
19	6	873	5.1152
20	8	682.5	5.3320
21	8	711	5.5547
22	8	754	5.8906
23	8	797	6.2266
24	8	841	6.5703
25	8	885	6.9141
26	8	916.5	7.1602
27	8	948	7.4063
28	2	reserved	
29	4	reserved	
30	6	reserved	
31	8	reserved	

TABLA 2.12 - Tabla 3 MCS [3]

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	Target code Rate $R \times [1024]$	Spectral efficiency
0	2	30	0.0586
1	2	40	0.0781
2	2	50	0.0977
3	2	64	0.1250
4	2	78	0.1523
5	2	99	0.1934
6	2	120	0.2344
7	2	157	0.3066
8	2	193	0.3770
9	2	251	0.4902
10	2	308	0.6016
11	2	379	0.7402
12	2	449	0.8770
13	2	526	1.0273
14	2	602	1.1758
15	4	340	1.3281
16	4	378	1.4766
17	4	434	1.6953
18	4	490	1.9141
19	4	553	2.1602
20	4	616	2.4063
21	6	438	2.5664
22	6	466	2.7305
23	6	517	3.0293
24	6	567	3.3223
25	6	616	3.6094
26	6	666	3.9023
27	6	719	4.2129
28	6	772	4.5234
29	2	reserved	
30	4	reserved	
31	6	reserved	

Todos estos informes de canal pueden ser periódicos o aperiódicos; y dependiendo de su precisión podrán ser selectivos en frecuencia o *wideband*. Esta información incluye parámetros tales como CQI, e incluso parámetros de multiplexación espacial como PMI o RI.

Tras analizar el canal podemos adaptar la modulación, código y seleccionar la multiplexación espacial a emplear. En esta próxima etapa se decide el tipo de multiplexación y número de flujos utilizables.

Tras las etapas previas y el correspondiente análisis de canal, cada bloque de transporte es asignado a un único o múltiples flujos espaciales. Finalmente se aplica la precodificación de antena en función de la multiplexación espacial elegida, enviando así los recursos de forma correcta a las antenas.

Además, como hemos mencionado anteriormente, es posible añadir un bloque adicional en sentido ascendente, la precodificación basada en DFT-S-OFDM, en cuyo caso no sería posible aplicar multiplexación espacial.

No entraremos en detalle en la transmisión multiantena, pero debemos conocer que los modos de multiplexación espacial disponibles son los mismos de LTE Advanced con algunas mejoras adicionales. En NR se permiten hasta 8 flujos en *downlink* y 4 en *uplink*. Gracias a todas estas técnicas MIMO podemos conseguir mayores velocidades binarias, menor retardo e incluso mayor capacidad celular, ofreciendo servicio a muchos más dispositivos.

En resumen, la capa física ha sido ampliamente mejorada para ofrecer mayor capacidad y latencias reducidas. Los dispositivos de baja latencia se pueden configurar sin *Dynamic Grant*, asignándoles así recursos fijos y permitiendo el envío inmediato sin tener que configurarlo previamente en cada conexión.

No obstante, no ha sido la única capa que ha sufrido mejoras. Las capas MAC y RLC han sido rediseñadas también para ofrecer baja latencia, al igual que el resto de protocolos y el propio núcleo de red. NR permite establecer conexión en cualquier instante, sin tener que esperar al comienzo de cada slot, permitiendo latencias aún más reducidas.

2.1.4. CANALES Y SEÑALES

En 5G existen tres tipos de canales:

- En primer lugar, los canales lógicos se encargan de transportar datos de usuario e información de control de niveles superiores.
- Por otro lado, los canales de transporte pueden multiplexar varios canales lógicos. Este canal se organiza en bloques de transporte que se generan cada cierto intervalo de tiempo o TTI. Este tiempo es variable pudiendo llegar a ser extremadamente pequeño con el fin de reducir extremadamente la latencia. El tamaño de los bloques de transporte también es variable dependiendo de la cantidad de datos a enviar por los canales lógicos.
- Finalmente, los canales físicos multiplexarán de igual manera varios canales de transporte. Este tipo de canales corresponden a recursos físicos asignables dentro de la interfaz radio. Estos recursos variarán según el tráfico generado por el terminal, dependiendo por tanto del TTI y tamaño de los bloques de transporte.

En Fig. 2.15 podemos apreciar los canales disponibles en 5G-NR.

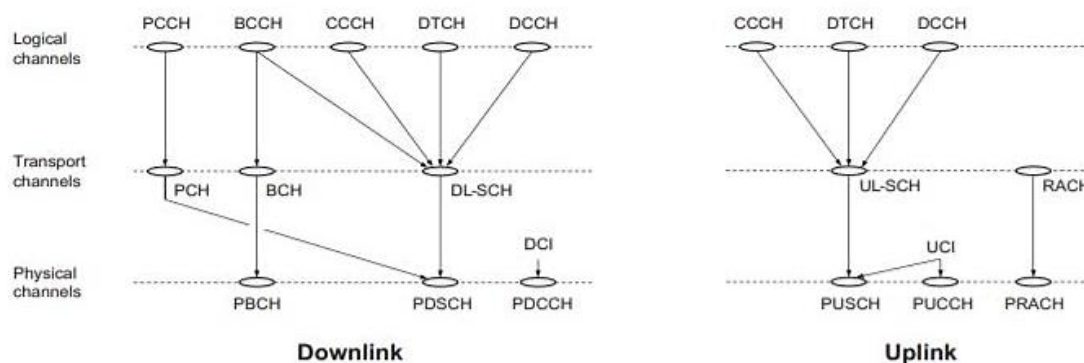


FIGURA 2.15 - Canales lógicos, físicos y de transporte [2]

Dentro de los canales lógicos encontramos:

- **BCCH** (Broadcast Control Channel, DL): contiene información general de configuración de red.
- **PCCH** (Paging Control Channel, DL): envía avisos a los terminales.
- **CCCH** (Common Control Channel, DL y UL): señalización común cuando no hay conexión activa.
- **DTCH** (Dedicated Traffic Channel, DL y UL): información dedicada.
- **DCCH** (Dedicated Control Channel, DL y UL): señalización dedicada.

En cuanto a los canales de transporte:

- **BCH** (Broadcast Channel, DL): sustenta parte del BCCH.
- **PCH** (Paging Channel, DL): sustenta el PCCH.
- **DL-SCH** (Downlink Shared Channel, DL): canal principal descendente compartido entre los usuarios.
- **UL-SCH** (Uplink Shared Channel, UL): canal principal ascendente compartido entre los usuarios.
- **RACH** (Random Access Channel, UL): preámbulos para acceso aleatorio.

Finalmente, dentro de los canales físicos:

- **PBCH** (Physical Broadcast Channel, DL): sustenta el BCH.
- **PDSCH** (Physical Downlink Shared Channel, DL): sustenta el DL-SCH y el PCH.
- **PDCCH** (Physical Downlink Control Channel, DL): decisiones de planificación de usuarios para sentido ascendente y descendente, e información relacionada.
- **PUSCH** (Physical Uplink Shared Channel, UL): sustenta el UL-SCH y el PCH.
- **PUCCH** (Physical Uplink Control Channel, UL): contiene los ACK/NACK de HARQ ascendentes, informes periódicos de estado de canal radio y petición de recursos ascendentes.
- **PRACH** (Physical Random Access Channel, UL): sustenta el RACH.

Por último, aparecen los canales de control tales como **DCI** (Downlink Control Information) y **UCI** (Uplink Control Information) que enviarán señalización asociada al nivel físico descendente y ascendente respectivamente.

Las señales **PSS** y **SSS** son necesarias para sincronizar el dispositivo con la estación base. Podemos observar la estructura de estas señales junto al canal físico PBCH en la [Fig. 2.16](#).

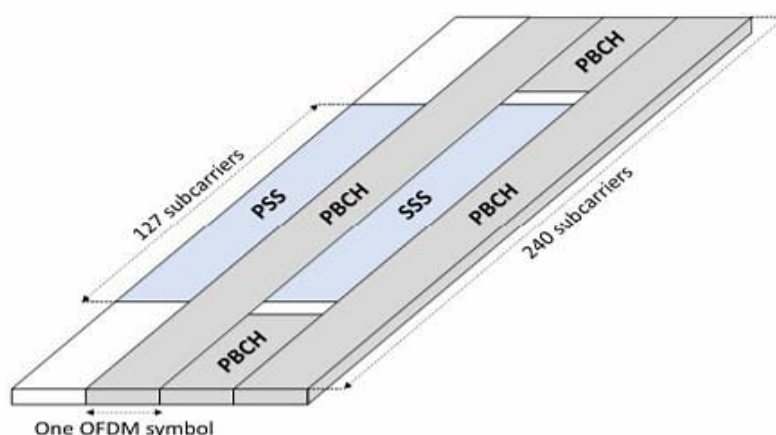


FIGURA 2.16 - Estructura del bloque SS/PBCH [2]

Las señales de sincronización ocupan un ancho espectral de 127 subportadoras. Estas señales pasarán por un filtro correlador que detectará el instante de llegada, permitiendo la perfecta sincronización con

la estación base. En la Fig. 2.17 se puede apreciar con detalle la señal de salida del filtro correlador, encargado de sumar la contribución de todos los símbolos dentro del ancho de banda especificado. En la parte superior se aprecia la llegada de una señal de sincronización.

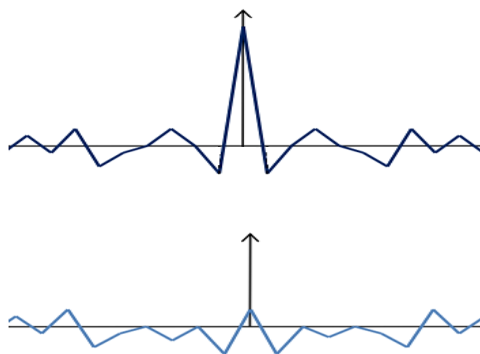


FIGURA 2.17 - Señal a la salida del filtro correlador

Gracias a la señal de sincronización primaria (PSS) el terminal realiza una sincronización parcial. Finalmente, con la señal de sincronización secundaria (SSS) el dispositivo consigue sincronizarse a nivel de trama. Tras sincronizarse, el terminal puede leer la información general de célula desde el canal físico PBCH.

La PSS y SSS dependen del identificador de célula o PCI. Hay 3 posibles PSS, 336 posibles SSS, formando un total de 1008 posibles PCIs. Estos bloques se transmitirán con una periodicidad de entre 5 a 160 ms, siendo usualmente 20 ms.

Esto supone un ahorro energético respecto a LTE. Este ahorro de energía se consigue también gracias a la eliminación de señales CRS o señales “always-on”.

Además, es posible aplicar barrido de haces en los bloques de sincronización, para mejorar la cobertura, permitiendo mayores ganancias. Esto es especialmente útil en la banda de ondas milimétricas debido a su gran atenuación. En la Fig. 2.18 se observa la estructura detallada del barrido de haz.

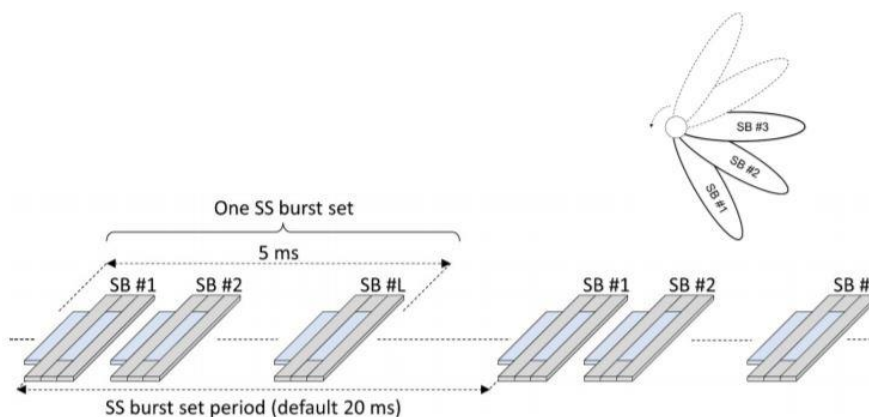


FIGURA 2.18 - Señales de sincronización y barrido de haces [2]

Por último, debemos conocer las señales empleadas para conocer el estado del canal radio e incluso demodular, conocidas como símbolos piloto.

Las señales DM-RS se usan para demodular en ambos sentidos. Además, en NR surgen las señales PT-RS. Estas señales funcionan en combinación con DM-RS, para hacer un seguimiento de fase más preciso. Las señales PT-RS surgen para compensar el elevado ruido de fase de los osciladores de alta frecuencia.

Por otro lado, NR mantiene las señales CSI-RS para la estimación del estado del canal radio. Asimismo, se incorporan las señales CSI-IM que permiten medir la interferencia dejando varios REs vacíos.

Las señales TRS permiten compensar el ruido de fase, aunque pueden parecer parecidas a las señales PT-RS no lo son.

Por último, para que la estación base pueda hacer una planificación de los recursos óptima en un escenario multiusuario se enviarán señales de sondeo o SRS en sentido ascendente que permitirán estimar el estado del canal radio de cada terminal.

Todas las señales de referencia pueden ser multipuerto excepto TRS por razones obvias.

Todas estas señales ocupan recursos radio y no entraremos a detallar la estructura de estas señales ya que sus formatos son muy variados. La estructura dependerá del tipo de señal empleada, del número de puertos de antena y de cualquier otro factor configurable por la base. En la Fig. 2.19 se expone como ejemplo varios formatos de señales CSI-RS.

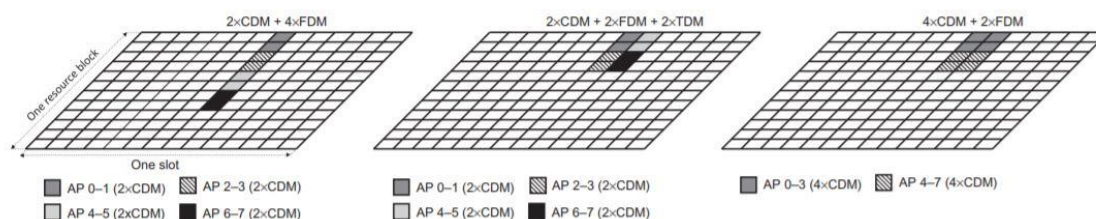


FIGURA 2.19 - Varios formatos de señales CSI-RS [5]

2.1.5. ESTADOS DE CONEXIÓN

En este apartado se verán los posibles estados en los que se encontrará un terminal una vez establecida la conexión con la estación base.

En la Fig. 2.20 aparecen los pasos que debe seguir cualquier dispositivo para conectarse a una célula NR.

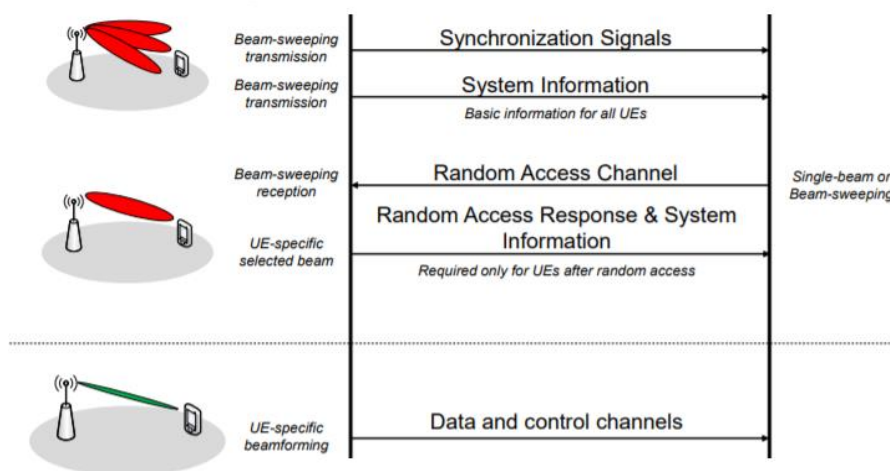


FIGURA 2.20 - Establecimiento de conexión en 5G-NR [6]

En primer lugar, el terminal se sincronizará gracias a las señales de sincronización PSS y SSS. Una vez sincronizado, el terminal estará en disposición de leer el canal PBCH, en donde podrá obtener la configuración e información general de la célula a la que se quiere conectar.

Inmediatamente después el terminal móvil podrá actualizar su posición, conectarse, restablecer avance temporal e incluso pedir recursos para transmitir información, todo ello gracias al canal de acceso aleatorio PRACH. La estación base reserva una serie de recursos OFDM para dicho canal que el móvil conoce tras leer la información general de la célula.

En la Fig. 2.21 podemos apreciar los pasos a seguir para el establecimiento de conexión:

1. Se enviarán preámbulo(s) de acceso por el canal PRACH. El preámbulo inicial se enviará con cierta potencia calculada previamente en bucle abierto. Los preámbulos sucesivos irán aumentando su potencia hasta obtener una respuesta de la célula.
El terminal debe seleccionar previamente un haz para mantener la directividad en sentido ascendente. La selección de haz se realiza gracias al barrido de haces utilizado por el bloque de sincronización SS/PBCH, eligiendo por tanto el haz más potente. Cada haz tendrá un canal PRACH asignado con distintos recursos tiempo-frecuencia. El terminal usará por tanto los recursos PRACH correspondientes al haz seleccionado para enviar sus preámbulos de acceso.
2. A continuación, la estación base responde por el canal DL-SCH. Asignando recursos al terminal y comunicándole su valor de avance temporal.
3. El móvil confirma su identidad por el canal UL-SCH
4. Finalmente, la estación base confirma la identidad del móvil escuchado para resolver posibles colisiones de acceso. Dicha confirmación se lleva a cabo de igual manera por el canal DL-SCH.

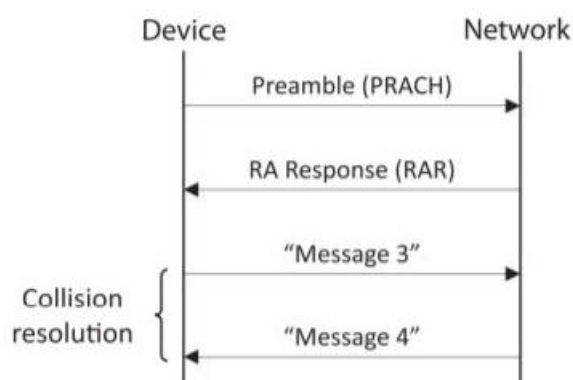


FIGURA 2.21 - Acceso aleatorio en NR [6]

Una vez el dispositivo consigue conectarse con la estación base, este podrá estar en tres estados de conexión distintos. En la Fig. 2.22 aparecen representados los tres estados de conexión disponibles 5G.

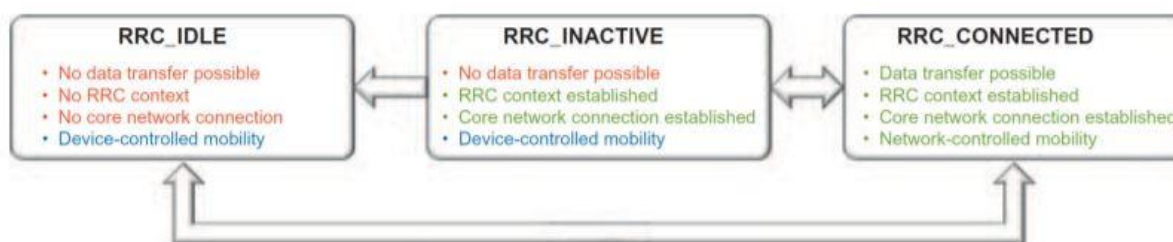


FIGURA 2.22 - Estados de conexión en 5G [2]

- En **RRC_IDLE** el móvil no podrá enviar información. Además, el terminal podrá moverse por todo el área de registro. El área de registro o comúnmente conocida como RA, es una lista de Tracking Areas por las que el móvil podrá moverse sin notificar a la red su posición. Esta lista es enviada por la red cuando el móvil se conecta. Al salir de la RA el móvil debe hacer una actualización de posición. Recibirá una nueva lista de Tracking Areas, la cual definirá la nueva RA. Las listas permiten una pequeña histéresis, evitando sobrecargar la red con actualizaciones innecesarias como se explicó anteriormente.
- En **RRC_INACTIVE** el móvil no podrá enviar información. No obstante, el terminal mantendrá la conexión con el núcleo de red y el contexto RRC, permitiendo establecimientos de conexión más rápidos y versátiles que en RRC_IDLE. En cuanto a la actualización de posición, esta vez el terminal deberá notificar a la red cuando cambie de RAN Notification Area. La RAN Notification Area puede ser una lista de Tracking Areas, una lista de RAN Areas o incluso una lista de células.

- En **RRC_CONNECTED** el terminal tendrá una conexión activa completa necesitando la red por tanto su posición a nivel celular.

En resumen, el estado del terminal variará en función de la información a enviar o recibir, llamadas entrantes o salientes, etc. El estado de conexión irá variando a lo largo del tiempo.

Tras conectarse, se realizará un refinamiento de haz e incluso siendo posible emplear múltiples haces dependiendo de la multiplexación espacial seleccionada. Todo esto se consigue gracias a las señales de sondeo o referencia como CSI-RS o SRS.

Por otro lado, encontramos los avisos o mensajes de “*paging*”. Transmitidos en su totalidad por el canal lógico PCCH. Los avisos se emplean para notificar al móvil conexiones entrantes, cambios en la información de sistema, etc.

Los mensajes de “*paging*” contienen la identidad del usuario o usuarios avisados. La identidad enviada podría ser 5G-S-TMSI o RNTI. Se utiliza DRX o transmisión discontinua, dividiendo a los móviles en grupos de aviso, en función de su identificador. El ciclo es configurable un valor múltiplo de tramas permitiendo así un mayor ahorro de energía en los terminales.

Finalmente, el traspaso o reelección de célula se llevará a cabo de diversas maneras, dependiendo exclusivamente del estado de conexión y de las medidas realizadas por los dispositivos que componen la red.

2.1.6. PLANIFICACIÓN DE RECURSOS RADIO

La planificación o *scheduling* es una función realizada por la estación base. Esta función consiste en asignar los recursos radio a cada terminal, indicando qué usuario recibe o transmite.

Se pueden asignar recursos ortogonales entre sí en tres dominios distintos, siendo estos el tiempo, la frecuencia y el espacio en caso de utilizar multiplexación espacial.

La planificación de recursos se realizará intentando maximizar la tasa binaria total y garantizando cierta equidad entre usuarios. Existirá por tanto un compromiso entre capacidad y equidad, que seleccionará cada operador al configurar la estación base. En las siguientes figuras podemos apreciar dos algoritmos de planificación aplicados en el dominio temporal. En la Fig. 2.24 aparece un algoritmo de máxima tasa y en la Fig. 2.23 un algoritmo de planificación proporcional que garantiza capacidad y equidad al mismo tiempo.

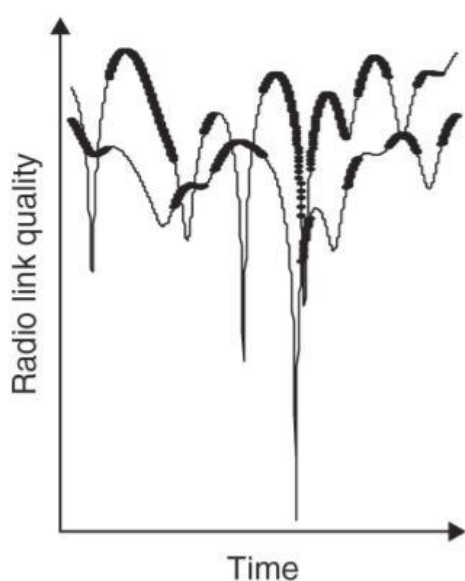


FIGURA 2.23 - Algoritmo de planificación proporcional [5]

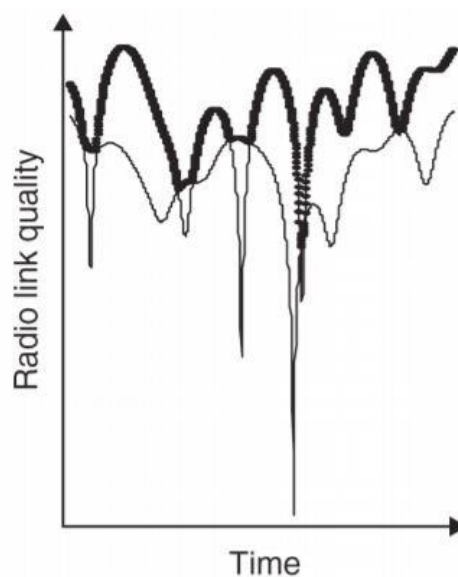


FIGURA 2.24 - Algoritmo de máxima tasa [5]

Finalmente, en la Fig. 2.25 se aprecia la asignación y planificación de recursos radio asignados a cada usuario dentro de una rejilla OFDM. En esta figura solo se planifican recursos temporales y frecuenciales, no obstante, también será posible utilizar otra dimensión adicional como el espacio con el fin de aumentar la capacidad celular.

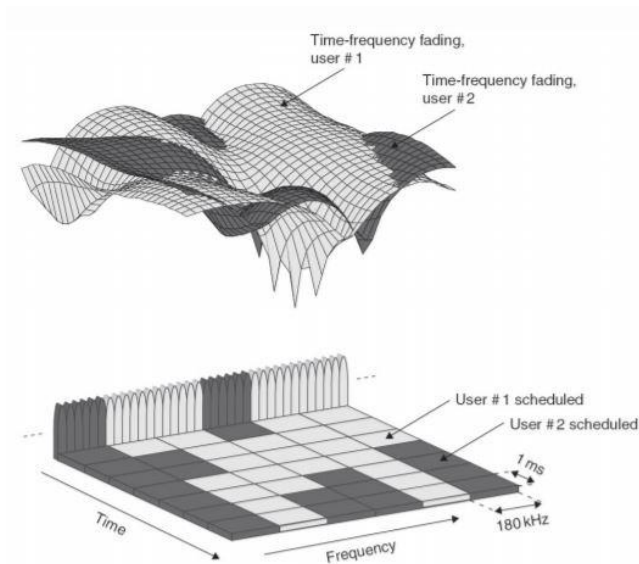


FIGURA 2.25 - Planificación de recursos en dos dimensiones [5]

3. ARQUITECTURA DEL SIMULADOR

3.1. ARQUITECTURA GENERAL

En este apartado describiremos brevemente la estructura general del simulador desarrollado íntegramente en el lenguaje de programación Python3. Se puede consultar el código completo en [8].

En la Fig. 3.1 se aprecia la arquitectura del simulador con sus diferentes archivos. En primer lugar, tenemos el archivo *'main.py'*, encargado de ejecutar el simulador. Este archivo es la piedra angular del simulador, es el encargado de medir el tiempo refresco, coordinar la ejecución de distintas funciones, e incluso de presentar los distintos resultados mediante gráficas.

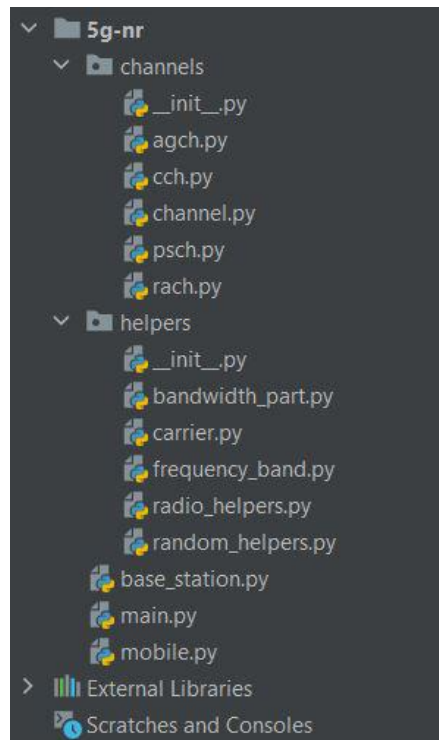


FIGURA 3.1 – Estructura del simulador

Los siguientes archivos más importantes son *'mobile.py'* y *'base_station.py'*, en donde residen las funciones más importantes del simulador y que permiten el correcto funcionamiento de la red.

En el fichero *'helpers'* encontramos diversos archivos de ayuda o estructuración. Entre *'random_helpers.py'* y *'radio_helpers.py'* encontramos funciones de ayudas aleatorias o de cálculo radio. Dentro de los archivos de estructura encontramos *'bandwidth_part.py'*, *'carrier.py'* y *'frequency_band.py'*.

Finalmente, dentro del fichero *'channels'* se encuentran todos los canales disponibles dentro del simulador. Estos irán insertados dentro de sus recursos radio correspondientes asignados por la estación base durante la simulación.

3.2.SIMULADOR

En el archivo ‘*main.py*’ se definen todos los parámetros necesarios del simulador. Dentro de los parámetros más importantes encontramos el tiempo de refresco, número de terminales, tasa de conexión, parámetros de la estación base, características radio, tamaño de célula, parámetros de los dispositivos, etc.

Una vez estos parámetros son definidos, el simulador ejecutará un bucle infinito definido por el tiempo de refresco. El tiempo empleado fueron 66 μ s, equivalente al período de símbolo definido básicamente por la numerología o distancia entre subportadoras empleada (15 kHz).

En este bucle se llevan a cabo diversas tareas, entre las cuales encontramos la presentación de resultados, la ejecución de planificadores radio de los terminales y la estación base, añadir nuevos terminales al entorno, etc.

3.3.ESTACIÓN BASE

La estación base quedará definida por el objeto Python3 de la [Fig. 3.2](#). Sus parámetros más importantes serán su identidad de célula, frecuencias de operación (n78), ancho de banda (49.5 MHz) numerología empleada (15 kHz), número de sectores, potencia de transmisión, ganancia de antena y densidad espectral de ruido del entorno.

```
def __init__(self, x, y, z, base_id, frequency_band, initial_frequency, final_frequency, subcarrier_spacing, sector,
            power, antenna_gain, noise_spectral_density, step_simulation_time):
```

FIGURA 3.2 – Funciones de la estación base 1

Dentro de la estación base, en [Fig. 3.3](#), encontramos funciones que permiten obtener o variar parámetros de la estación base como su posición, identidad, potencia por subportadora, frecuencias e incluso la propia rejilla de recursos de la célula.

```
def get_x(self):
def get_y(self):
def get_z(self):
def get_base_id(self):
def get_power(self):
def get_power_per_subcarrier(self):
def get_initial_frequency(self):
def get_final_frequency(self):
def get_bandwidth(self):
def get_subcarrier_spacing(self):
def get_duplex(self):
def get_mimo(self):
def get_carrier_grid(self):
def set_carrier_grid(self, channel, carrier, resource, subframe):
```

FIGURA 3.3 - Funciones de la estación base 2

En la Fig. 3.4, aparecen tres funciones encargadas de guardar las prestaciones de la estación base a lo largo del tiempo, con el fin de mostrarlas en la presentación de resultados y graficado.

```
def save_info(self):
def get_info(self):
def get_save(self):
```

FIGURA 3.4 - Funciones de la estación base 3

Para manipular de forma sencilla la rejilla de recursos aparecen otras funciones visibles en la Fig. 3.5. Estas funciones permiten limpiar, rellenar y buscar recursos libres. Además, la función *'change_resources(self, mobile)'* permite cambiar los recursos de un terminal si este no tiene los recursos suficientes, no tiene baja latencia o simplemente los malgasta.

```
def searching_followed_empty_REs(self, n_followed_REs, mimo_quadrant):
def empty_RE(self, RB, subframe, mimo_quadrant):
def filling_REs(self, initial_RB, initial_subframe, final_RB, final_subframe, uplink_REs, downlink_REs,
                mimo_quadrant, mobile, uplink_modulation, downlink_modulation):
def change_resources(self, mobile):
```

FIGURA 3.5 - Funciones de la estación base 4

La estación base posee una función de configuración, disponible en Fig. 3.6, dicha función se ejecuta al iniciar el simulador. Esta función es la encargada de rellenar y reservar los recursos radio de la célula. Asigna un espacio para los bloques de sincronización SS/PBCH, RACH y canales de respuesta. También reserva recursos para los canales dedicados PDSCH, PUSCH, PDCCH y PUCCH.

Se han asignado finalmente un total de 44 bloques de recurso o RBs para bloques de sincronización, acceso aleatorio y respuesta. Sabiendo que la base soporta un total de 275 RBs, el resto irá destinado para canales de tráfico y control.

```
def configuration(self):
```

FIGURA 3.6 - Funciones de la estación base 5

La siguiente función de gran importancia es el planificador, encargado de asignar y planificar los recursos radio de la estación base. En la Fig. 3.7 podemos apreciar dicha función. Esta función responde las peticiones de acceso realizadas por el canal RACH siempre que no se hayan producido colisiones multiusuario. La respuesta se envía por el canal de respuesta, denominado AGCH en nuestro simulador, asignando los recursos necesarios al terminal correspondiente.

```
def scheduler(self, subframe):
```

FIGURA 3.7 - Funciones de la estación base 6

Finalmente, en la Fig. 3.8, aparece la última función de la estación base disponible, el planificador largo. Este planificador se separa del planificador corto para acelerar la ejecución del simulador, ya que este último se ejecuta tan solo una vez por segundo. Este planificador se encargará de reducir los recursos de ciertos terminales en caso de colapso celular, cargas superiores al 80 %, penalizando a los terminales con peor SINR o con recursos excesivos. Esta función también guardará las prestaciones más relevantes de la estación base para mostrarlos en la presentación de resultados.

```
def long_scheduler(self):
```

FIGURA 3.8 - Funciones de la estación base 7

3.4. TERMINALES MÓVILES

Los terminales tienen una estructura similar a la estación base, en primer lugar, se presenta la arquitectura del terminal en la Fig. 3.9.

```
def __init__(self, x, y, z, mobile_id, power, antenna_gain, noise_spectral_density, traffic_type, latency, subcarrier_spacing, step_simulation_time):
```

FIGURA 3.9 - Funciones del terminal móvil 1

Existen siete categorías de terminales clasificadas en función de su tráfico apreciables en Fig. 3.10, Fig. 3.11, Fig. 3.12, Fig. 3.13, Fig. 3.14, Fig. 3.15, Fig. 3.16 y Fig. 3.17.

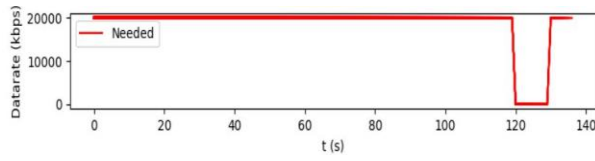


FIGURA 3.10 - Categoría de terminal 0

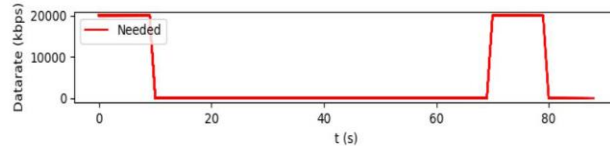
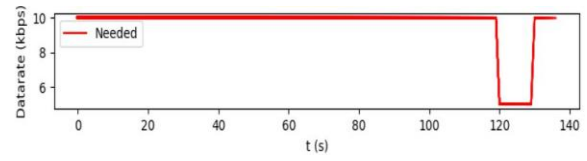


FIGURA 3.11 - Categoría de terminal 1

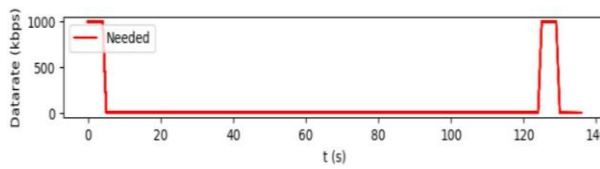
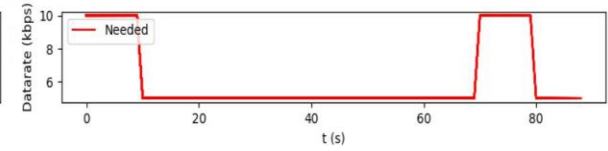


FIGURA 3.12 - Categoría de terminal 2

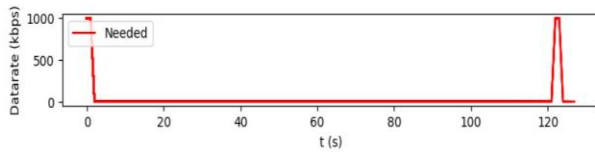
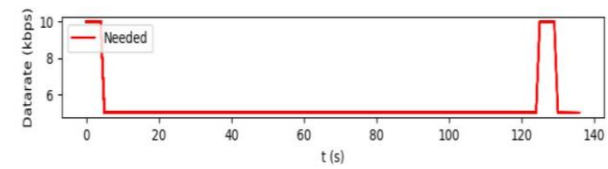


FIGURA 3.13 - Categoría de terminal 3

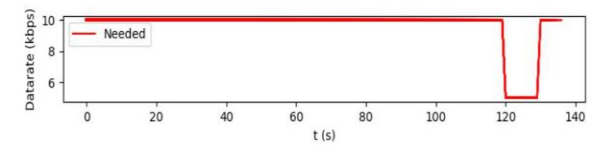
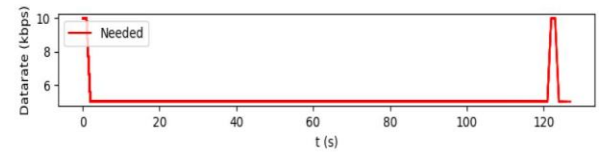


FIGURA 3.14 - Categoría de terminal 4

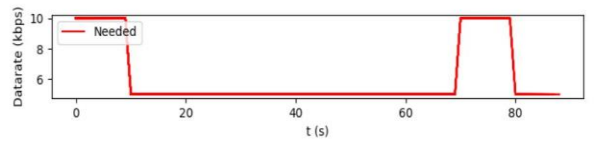
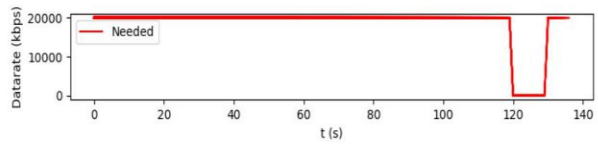


FIGURA 3.15 - Categoría de terminal 5

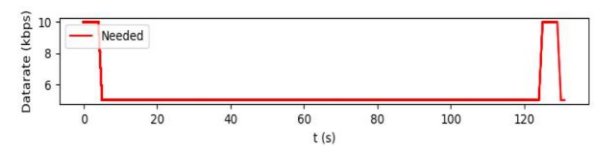
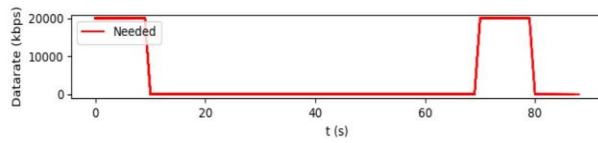


FIGURA 3.16 - Categoría de terminal 6

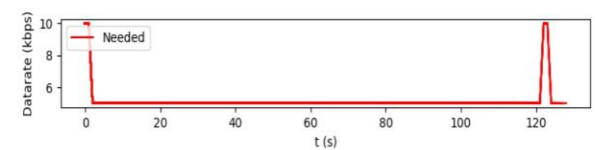
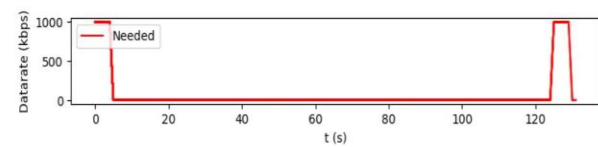
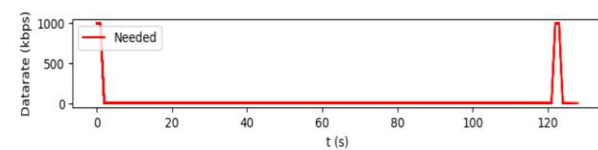


FIGURA 3.17 - Categoría de terminal 7



Encontramos funciones de obtención o variación de variables del propio terminal como su posición, velocidad, cuadrante, estado, etc. Dichas funciones aparecen en Fig. 3.18.

```
def get_x(self):
def get_y(self):
def get_z(self):
def move(self, x, y, z):
def get_quadrant(self):
def get_state(self):
```

FIGURA 3.18 - Funciones del terminal móvil 2

Al igual que en la estación base, encontramos tres funciones encargadas de guardar las prestaciones a lo largo del tiempo para de mostrarlas en la presentación de resultados. En la Fig. 3.19 aparecen dichas funciones.

```
def save_info(self):
def get_info(self):
def get_save(self):
```

FIGURA 3.19 - Funciones del terminal móvil 3

Finalmente, en la Fig. 3.20, aparece la última función del terminal, el planificador de recursos. Esta función guardará las prestaciones más relevantes del terminal móvil para mostrarlos durante la presentación de resultados. Además, realizará distintas tareas que variarán en función del estado en el que se encuentre el terminal.

```
def scheduler(self, base_station, subframe):
```

FIGURA 3.20 - Funciones del terminal móvil 4

En la Fig. 3.21 aparecen los estados en los cuales se puede encontrar cada terminal. Los estados son los siguientes:

- Searching: El terminal buscará una célula a la que conectarse. Pasará al estado Reading cuando encuentre un bloque de sincronización SS/PBCH.
- Reading: En este estado se inicia un contador aleatorio, referente al tiempo que tarda el terminal en leer el canal PBCH. Al acabar de leer dicho canal pasa al estado Connecting.
- Connecting: El terminal enviará una petición de acceso por el canal de acceso aleatorio, pasando al estado Waiting o estado de espera.
- Waiting: En este estado el terminal esperará la llegada de una posible respuesta, si esta respuesta no llega al acabar cierto temporizador el terminal volvería al estado Connecting enviando una nueva petición. Si el terminal recibe respuesta pasa al estado Connected.
- Connected: El terminal puede enviar y recibir datos por los recursos asignados. Estos recursos pueden ir variando y estas variaciones se enviarán por los recursos de control.

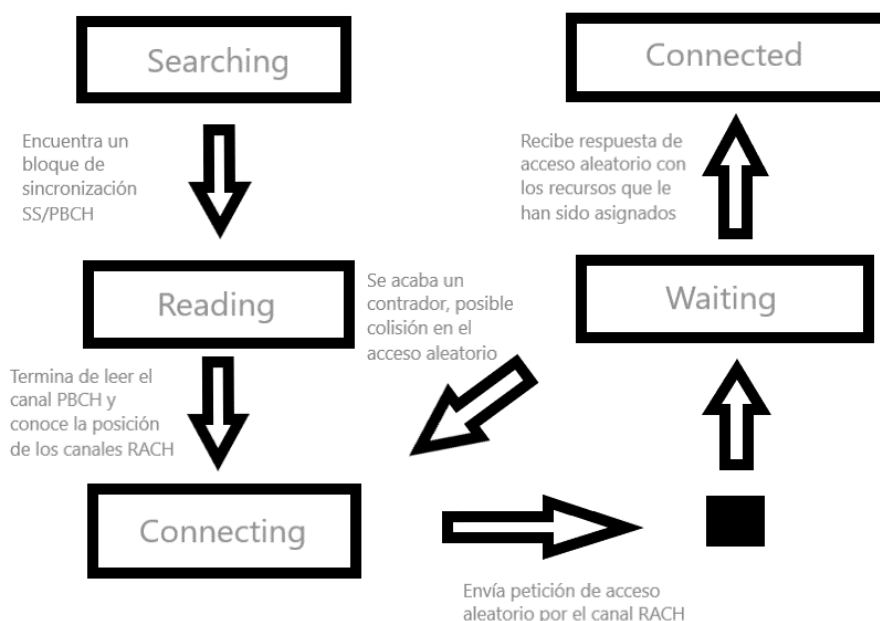


FIGURA 3.21 - Estados de conexión del terminal

3.5. PARÁMETROS Y MODELOS DE PROPAGACIÓN RADIO

En este apartado entraremos en detalle con los modelos de propagación radio y sus parámetros. En primer lugar, se decidió utilizar una de las bandas pioneras 5G en Europa, por ello se seleccionó la banda n78, banda TDD situada en torno a 3.8 GHz.

El modelo seleccionado para calcular las pérdidas de propagación fue el Rec. P.1411 del UIT-R. Dicho modelo es apto para el rango de frecuencias de 3.4 a 3.8 GHz en entornos urbanos. El modelo sigue la regresión (3.1) con una variable Gaussiana aditiva $N(0, \sigma)$ de desviación típica σ (dB).

$$L_b(d, f) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) + N(0, \sigma) \text{ dB} \quad (3.1)$$

d : distancia entre estación base y terminal (m)

f : frecuencia (GHz)

α : coeficiente asociado con el incremento de pérdida básica de transmisión con la distancia

β : coeficiente constante

γ : coeficiente asociado con el incremento de pérdida básica de transmisión con la frecuencia

TABLA 3.1 - Constantes del modelo de propagación Rec. P.1411 UIT-R

Frequency range (GHz)	Distance range (m)	Type of environment	LoS/NLoS	α	β	γ	σ
0.8-73	5-660	Urban high-rise, Urban low-rise/ Suburban	LoS	2.12	29.2	2.11	5.06

Finalmente, tras calcular las pérdidas de transmisión, se realiza el balance de enlace con (3.2) para conocer la potencia recibida.

$$P_r = P_t - L_{at} + G_t - L_b + G_r - T_{tr} \quad (3.2)$$

La potencia total de transmisión de la estación base es 38 dBm, pero debemos hacer el balance de enlace con la potencia de cada recurso elemental. Por tanto, habrá que dividir entre la cantidad total de

recursos utilizados, lo mismo ocurre para el balance ascendente y la potencia de transmisión del terminal. La potencia total seleccionada para el terminal fueron 22 dBm.

La ganancias de antena de la estación base es 17 dB, mientras que la antena del móvil hemos supuesto una antena omnidireccional de 0 dB. Finalmente, las pérdidas por imperfecciones en los receptores se han supuesto de 3 dB.

Por último, calculamos la SINR en recepción, sabiendo que el ruido térmico del receptor es de -173.8 dBm/Hz y que el término interferencia ya ha sido incluido en las imperfecciones del receptor. Tras conocer la SINR podemos deducir la eficiencia espectral calculada a partir de la fórmula (3.3) de Shannon.

$$SE_{SISO} = \log_2(1 + \text{sinr}_{eff}) \quad (3.3)$$

Una vez obtenemos la densidad espectral, redondeamos al entero más bajo. Este redondeo baja la capacidad de transmisión, pero es realmente importante porque permite redondear la transmisión de posibles cabeceras, segmentos de control o señales de sondeo.

Por tanto, la densidad espectral redondeada corresponderá al número de bits por símbolo empleados y por tanto definirá la modulación empleada.

Para conocer la velocidad total debemos emplear la fórmula (3.4)

$$R_b = V_{SYM} \cdot M \cdot 12 \cdot RB \quad (3.4)$$

V_{SYM} : Velocidad de símbolo calculada que dependerá de la numerología aplicada

M : Bits de modulación empleada

RB : Número de bloques de recurso empleados en la transmisión

4. RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos tras la simulación de dos escenarios. Se han puesto a prueba finalmente dos microcélulas en entorno urbano e industrial.

4.1. MICROCELDA URBANA

En la [Tabla. 4.1](#) encontramos los parámetros seleccionados durante la simulación del entorno urbano.

TABLA 4.4.1 - Parámetros microcélula urbana

MICROCELDA URBANA	
ENTORNO	
Tamaño de la célula	250 x 250 m ²
Densidad espectral de ruido	- 173.8 dBm / Hz
ESTACIÓN BASE	
Sectores	4
NR Band	n78
Banda de frecuencias	3.75 GHz – 3.8 GHz
Ancho de banda	49.5 MHz
Distancia entre subportadoras	15 kHz
Potencia transmitida	38 dBm
Ganancia de antena	14 dBi
Pérdidas e interferencias	- 3 dB
Bloques de recurso totales	275 RBs
Bloques de recurso SS/PBCH	20 RBs
Bloques de recurso RACH y Respuesta	24 RBs
Bloques de recurso PDSCH y PUSCH	231 RBs
TERMINAL MÓVIL	
Dispositivos iniciales: M_0	20 dispositivos
Tasa de conexión: M_T	20 dispositivos / s
Velocidad de terminal	4 km / h
Potencia transmitida	22 dBm
Ganancia de antena	0 dBi
Pérdidas e interferencias	- 3 dB
Categorías de terminal	CAT0, CAT1, CAT2, CAT3, CAT4, CAT5, CAT6, CAT7

En la [Fig. 4.1](#), [Fig. 4.2](#) y [Fig. 4.3](#) se aprecia la evolución de la estación base en función del tiempo. Conociendo los dispositivos iniciales (M_0) y la tasa de conexión de nuevos terminales (M_T), podemos deducir fácilmente con (4.1) el número de dispositivos presentes en los alrededores de la célula.

$$M = M_0 + M_T \cdot t \quad (4.1)$$

En la Fig. 4.1 se aprecia a lo largo del tiempo la sobrecarga de la célula según aumenta el número de dispositivos conectados. La sobrecarga de la estación base crece durante los primeros instantes debido al incremento lineal de terminales. No obstante, la carga comienza a oscilar más tarde.

Para evitar el colapso de la red, la estación base comienza a limitar sus recursos siendo esta la causa principal de la oscilación. Cuando la carga total de la célula supera el 80%, los sectores comienzan a gestionar de forma más eficiente sus recursos. Además, el tráfico es discontinuo por naturaleza, siendo este el causante también de algunas fluctuaciones.

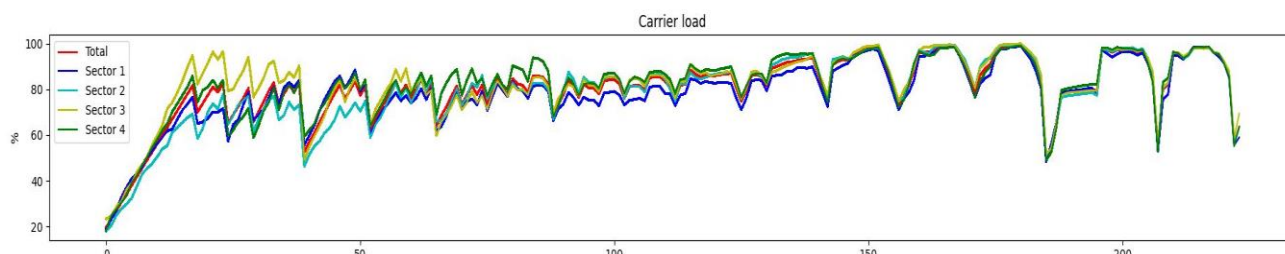


FIGURA 4.1 - Carga celular de la microcelda urbana

Como hemos mencionado anteriormente, la estación base limitará los recursos cuando la carga celular total alcance el 80%. La estación base gestionará los recursos de cada terminal de forma más eficiente y equitativa para evitar el colapso de la red y ofrecer un servicio de calidad.

Para ello, la célula limitará los recursos de forma progresiva, comenzando por los terminales con peor calidad de canal, y por tanto priorizando a los usuarios con mayor SINR. También los terminales “más avariciosos” o con mayor consumo de recursos sufrirán ciertas limitaciones.

En la Fig. 4.2 podemos observar la limitación de recursos, siendo esta cada vez mayor con la llegada de nuevos usuarios. En esta gráfica cada unidad de recurso corresponde a un slot temporal de 12 subportadoras o RB.

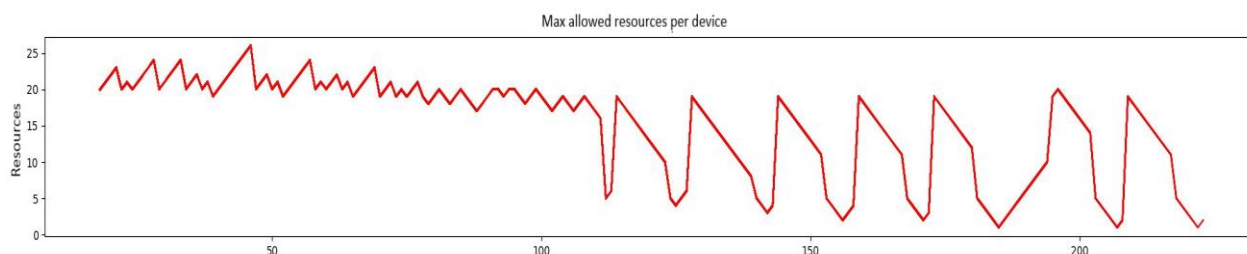


FIGURA 4.2 - Máximo número de recursos permitidos por terminal

Finalmente, en la Fig. 4.3 aparece representado el número total de dispositivos. En dicha figura se aprecia de forma directa como el total de terminales coincide siempre con los dispositivos conectados, pues la tasa de conexión es extremadamente reducida, veinte nuevos terminales por segundo, por lo que apenas se producen colisiones por acceso aleatorio.

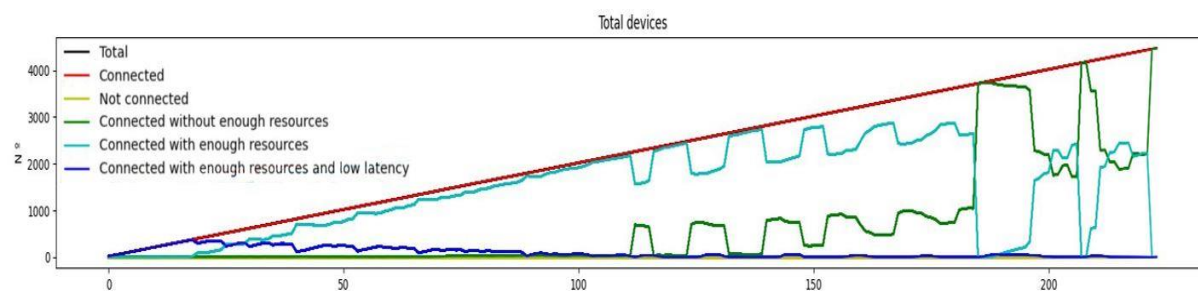


FIGURA 4.3 - Número de terminales

Por otro lado, aparecen tres categorías distintas de conexión clasificadas en función de sus recursos y latencia, siendo mutuamente excluyentes todas ellas.

En primer lugar, encontramos los terminales de latencia reducida y recursos suficientes. Con latencia reducida nos referimos a latencias pico cercanas al milisegundo. Además, estos terminales poseen recursos suficientes para satisfacer con creces sus servicios. Durante los primeros instantes la mayoría de terminales disfruta de latencias pico reducidas, sin embargo, este número comienza a descender a partir del segundo diecisiete, habiendo cerca de 380 conexiones para entonces. En el segundo veinticinco, con casi 540 dispositivos conectados a la célula, tan solo la mitad de los terminales disfruta de latencias pico reducidas. Finalmente, tras el segundo cincuenta, solo un cuarto de los dispositivos totales pertenece a esta categoría. Esta jerarquía de terminal cae progresivamente hasta ser prácticamente inexistente.

En segundo lugar, aparecen los terminales con recursos suficientes. Esta categoría es prácticamente inexistente al principio, ya que la mayor parte de los terminales adolece de baja latencia. No obstante, esta categoría comienza a incrementarse rápidamente en el momento en el que los servicios de baja latencia se hacen impracticables.

Finalmente, encontramos los dispositivos conectados sin recursos necesarios para satisfacer sus servicios. Observamos que durante un largo periodo de tiempo esta categoría es realmente reducida. Además, al principio, dicha categoría suele ser tan solo momentánea debido a las variaciones multirayecto. Este fenómeno de momentaneidad se puede observar mejor en la Fig. 4.4. En esta figura aparece representado el mapa celular en dos intervalos temporales próximos, apreciándose como a pesar de que el número de terminales sin recursos suficientes se mantenga constante, los dispositivos que se encuentran en dicho estado van variando.

En línea general todos los dispositivos tienen los recursos necesarios. Pero, si un terminal no tuviese recursos suficientes durante un cierto periodo de tiempo, la estación base le asignaría más siempre que fuese posible.

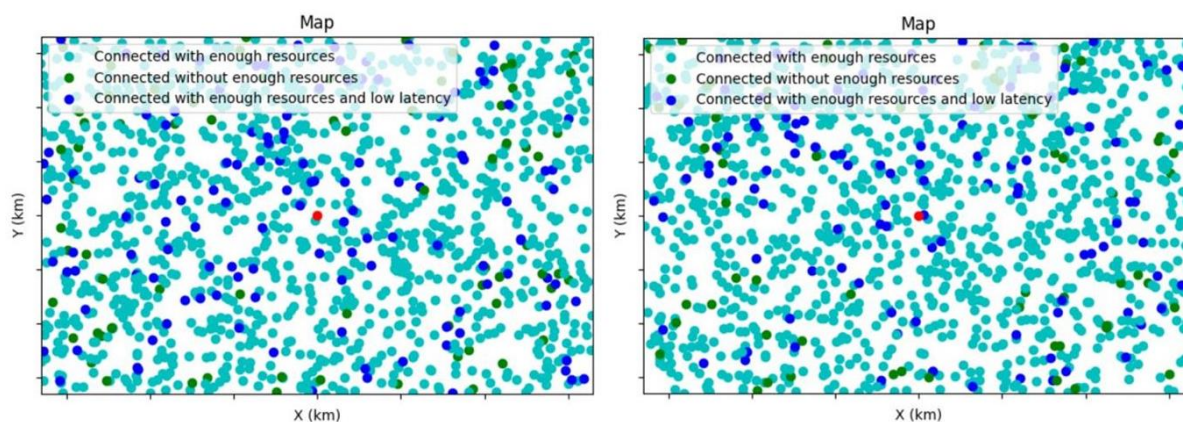


FIGURA 4.4 - Mapa celular

Este fenómeno de variabilidad multirayecto se aprecia mejor en la Fig. 4.5. En esta figura se representa un terminal de categoría 5 junto con sus indicadores más significativos. En dicha figura aparecen los parámetros del terminal para ambos enlaces, tanto descendente como ascendente.

En la primera fila encontramos la potencia transmitida y recibida. La potencia media recibida es aproximadamente constante ya que la velocidad de los terminales es extremadamente baja. No obstante, si aparece cierta variabilidad multirayecto.

En la segunda fila aparecen los recursos que tiene el dispositivo a su disposición para cada enlace. Vemos que se encuentra altamente relacionado con la latencia del dispositivo. En algunos instantes la latencia del terminal se hace infinita debido a la escasez de recursos.

En la cuarta fila aparece representada la modulación instantánea empleada en ese momento. La modulación empleada varía también debido al multirayecto.

Finalmente, en la última fila, se representan conjuntamente el *datarate* consumido por el terminal y el caudal binario ofrecido por la red. En general la red es capaz de ofrecer el caudal necesario para satisfacer las necesidades del terminal. Además, se aprecian caídas de caudal causado por la escasez de recursos o caída de modulación.

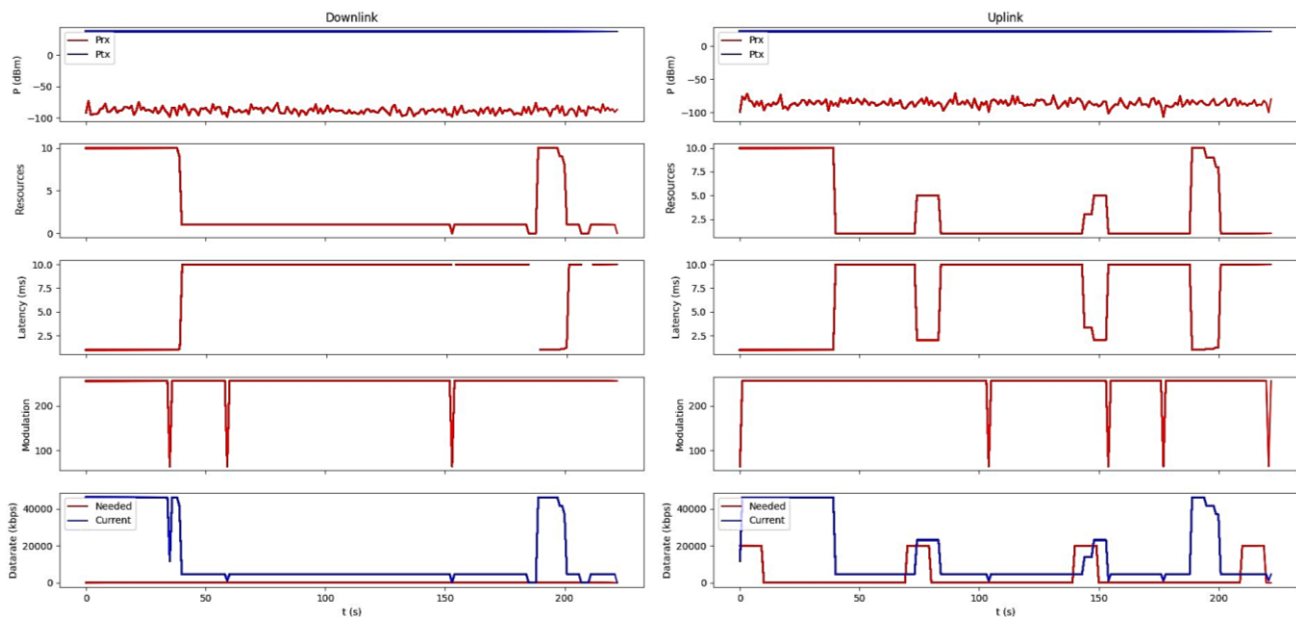


FIGURA 4.5 - Parámetros de un terminal de Categoría 5

En términos generales, con 400 conexiones activas, la estación base es capaz de ofrecer servicios de baja latencia a todos sus terminales. En cambio, con 550 dispositivos conectados, los servicios de baja latencia se desploman a la mitad. A partir de dicho instante la baja latencia comienza a caer progresivamente.

Otro punto de inflexión es el instante $t = 165$ s, con cerca de 3300 conexiones activas, la estación base sufre un colapso importante, en donde la célula es incapaz de dar servicio a multitud de dispositivos. La célula vuelve a recuperarse, pero más tarde colapsa de nuevo. El planificador de recursos no consigue evitar el colapso abrupto, por ello para lograr dicho objetivo las estaciones base reales incluyen en sus planificadores algoritmos de *Machine Learning* e Inteligencia Artificial. No obstante, podemos decir que con 3300 conexiones la estación base deja de ofrecer servicios de calidad, puesto que más de la mitad de los terminales no posee los recursos suficientes para satisfacer sus necesidades.

4.2.MICROCELDA INDUSTRIAL

En la [Tabla. 3.2](#) encontramos los parámetros seleccionados durante la simulación del entorno urbano.

TABLA 4.4.2 - Parámetros entorno industrial

MICROCELDA URBANA	
ENTORNO	
Tamaño de la célula	400 x 400 m ²
Densidad espectral de ruido	- 173.8 dBm / Hz
ESTACIÓN BASE	
Sectores	4
NR Band	n78
Banda de frecuencias	3.75 GHz – 3.8 GHz
Ancho de banda	49.5 MHz
Distancia entre subportadoras	15 kHz
Potencia transmitida	38 dBm
Ganancia de antena	14 dBi
Pérdidas e interferencias	- 3 dB
Bloques de recurso totales	275 RBs
Bloques de recurso SS/PBCH	20 RBs
Bloques de recurso RACH y Respuesta	24 RBs
Bloques de recurso PDSCH y PUSCH	231 RBs
TERMINAL MÓVIL	
Dispositivos iniciales	20 dispositivos
Tasa de conexión	20 dispositivos / s
Velocidad de terminal	4 km / h
Potencia transmitida	22 dBm
Ganancia de antena	0 dBi
Pérdidas e interferencias	- 3 dB
Categorías de terminal	CAT2, CAT3, CAT6, CAT7

En la [Fig. 4.6](#), [Fig. 4.7](#) y [Fig. 4.8](#) se aprecia la evolución de la estación base en un entorno industrial en función del tiempo.

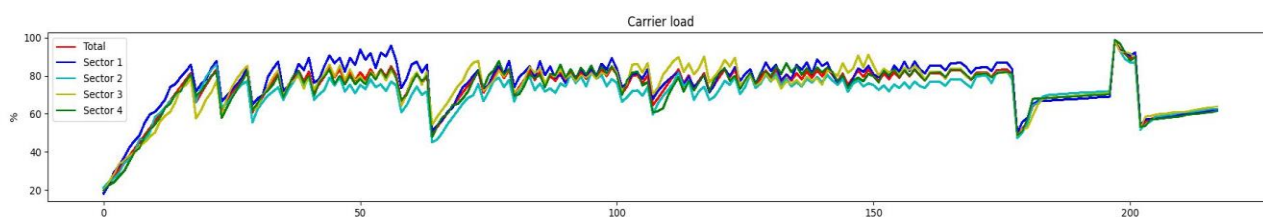


FIGURA 4.6 - Carga celular de la microcelda industrial

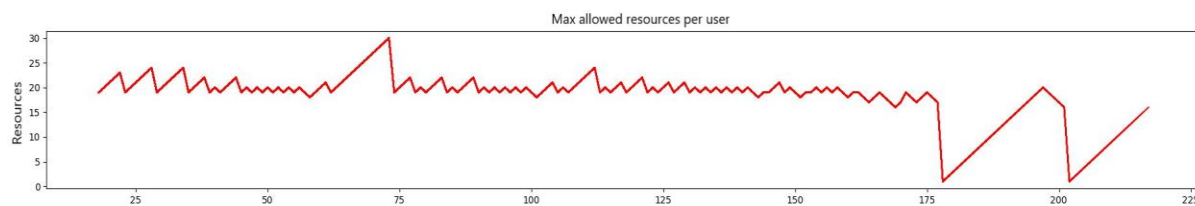


FIGURA 4.7- Máximo número de recursos permitidos por terminal

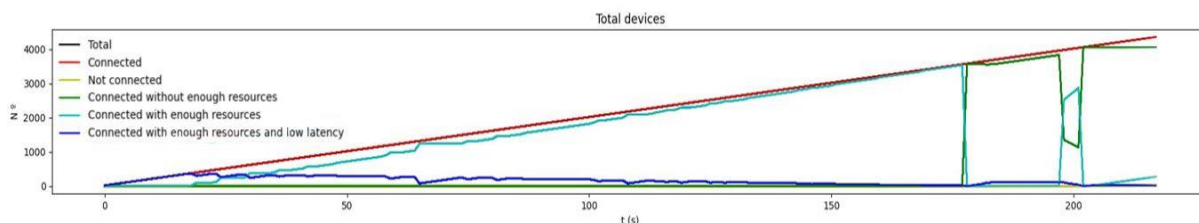


FIGURA 4.8 - Número de terminales

Finalmente, en la Fig. 4.9 se representa un terminal de categoría 2 junto con sus parámetros más importantes dentro del entorno industrial.

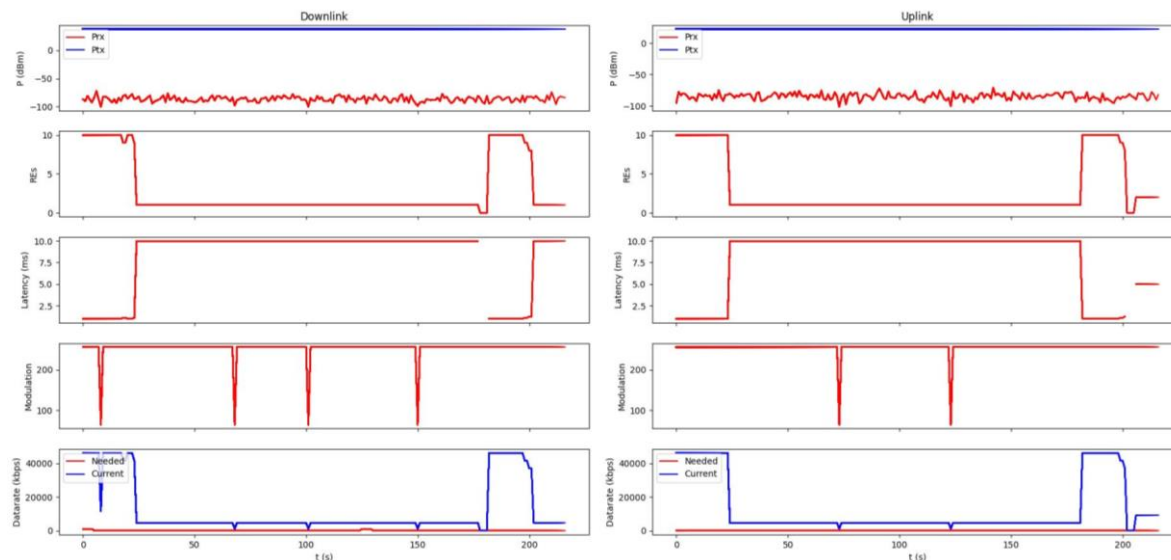


FIGURA 4.9 - Parámetros de un terminal Categoría 2

En general, el microcelda industrial es prácticamente idéntica a la microcelda urbana en términos de latencia, con 400 conexiones activas, la estación base puede ofrecer baja latencia a todos sus terminales. En cambio, con 550 dispositivos conectados, los servicios de baja latencia caen a la mitad.

No obstante, en términos de capacidad la microcelda industrial permite dar servicio a muchos más terminales. El primer gran colapso de la estación base se produce en el instante $t = 180$ s, con 3640 conexiones. Como mencionamos anteriormente en la microcélula urbana, la estación base sufre un colapso abrupto en ese punto, por ello sería interesante incluir en el planificador algún algoritmo de Inteligencia Artificial que controle los recursos de forma óptima en dicha situación.

Se podría decir que la estación base ofrece servicios de calidad con 3640 conexiones activas. Con 4400 conexiones la estación base dejaría de ofertar dicho servicio de calidad puesto que más de la mitad de los terminales no posee los recursos suficientes.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1. CONCLUSIONES

Las microcélulas simuladas, de numerología 15 kHz, son capaces de ofrecer latencias pico cercanas al milisegundo. No obstante, la baja latencia está ampliamente limitada por el número de usuarios presente en la célula, ya que como hemos visto, con tan solo 550 dispositivos, los terminales de baja latencia caían a la mitad. Obviamente, la base sería capaz de conseguir resultados más prometedores si estuviese dotada de multiplexación espacial.

Los resultados obtenidos en términos de latencia son bastante pobres para lo que se espera de la tecnología NR. La numerología seleccionada no es la más apropiada para estos escenarios, ya que no posee una rejilla de recursos con suficientes subdivisiones temporales.

En la Fig. 5.1 siendo $\Delta f_1 = \Delta f_2$ y $\Delta t_1 = \Delta t_2$, se puede apreciar dicho fenómeno. Observamos como numerologías con distancias entre subportadoras superiores poseen mayor número de subdivisiones temporales en su rejilla. Esto permite afinar mucho más en el dominio temporal, permitiendo que los usuarios gocen de latencias pico inferiores e incluso dar servicio de baja latencia a muchos más terminales.

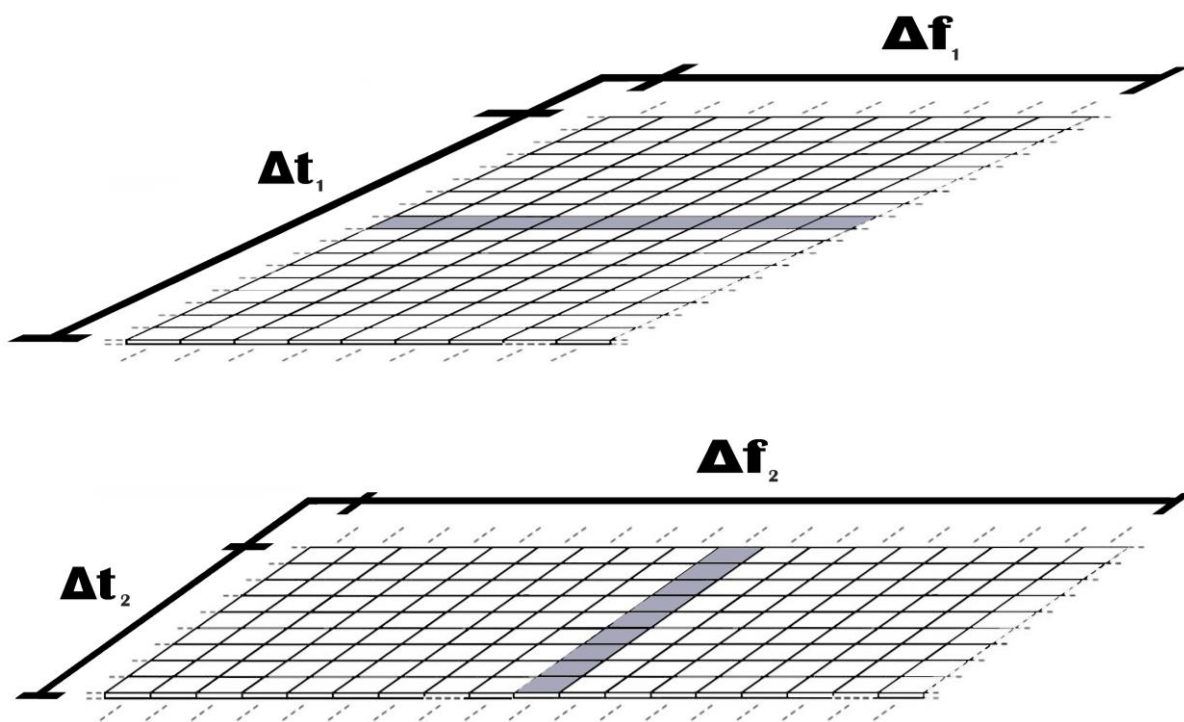


FIGURA 5.1 - Comparación de distintas numerologías NR

Además, las distancias entre subportadoras mayores poseen mayor tolerancia a la dispersión Doppler, es decir, tiempos de coherencia pequeños, ya que sus símbolos son extremadamente cortos. Esta cualidad es especialmente útil en escenarios de alta movilidad. Además, el ruido de fase es mayor en frecuencias altas por lo que puede ser especialmente útil en estas situaciones.

No obstante, no todo son ventajas para las distancias entre subportadoras grandes. Interesa también Δf pequeñas puesto que su prefijo cíclico es más largo, permitiendo absorber mejor los posibles ecos de canal o dispersión de retardo. Esto es especialmente importante para mantener la ortogonalidad entre subportadoras y evita un fenómeno indeseable como es la interferencia entre símbolos o ISI.

Sin embargo, en nuestros escenarios, microcélula urbana y microcélula industrial, hubiese sido más interesante emplear una distancia entre subportadoras mayor. Los requisitos de latencia reducida de dichos escenarios son especialmente importantes y además los ecos de canal son bastante reducidos

en estos entornos. Por tanto, podemos decir que la numerología óptima de ambos entornos hubiese sido 60 kHz, permitiendo dar servicio de baja latencia a mayor número de dispositivos.

No obstante, en términos de capacidad, el cambio de numerología no hubiese supuesto ninguna mejora respecto a lo conseguido previamente, puesto que el número de recursos radio asignables seguiría siendo el mismo.

La microcélula urbana de $250 \times 250 \text{ m}^2$ consiguió aproximadamente 3.300 terminales funcionando a pleno rendimiento. Si hacemos cálculos, este número supone 58.200 conexiones por km^2 . Si comparamos la densidad de población de alguna ciudad, por ejemplo, Madrid con cerca de 5337 personas por km^2 , nos daremos cuenta de que supera con creces nuestras expectativas.

No obstante, el ITU-R estableció un millón de conexiones por km^2 como objetivo a lograr por la tecnología NR. Este objetivo permitiría instalar IoT por toda la ciudad logrando así la ansiada *Smart City* o ciudad inteligente. Para ello debemos sumar todo el espectro 5G disponible. Si lo hacemos cuentas comprenderemos la necesidad extrema de las bandas milimétricas o *mmWave*, que permitirán densificar la red alcanzando dichos niveles establecidos por el ITU-R.

Volvemos a recalcar, la importancia de la multiplexación espacial, pudiendo alcanzar prestaciones muy superiores a las obtenidas en la simulación.

Por otro lado, la microcélula industrial de $400 \times 400 \text{ m}^2$ obtuvo cerca de 3640 conexiones simultáneas. En este tipo de entornos es de especial importancia la baja latencia y alta densificación. Por lo que sería realmente interesante dotar de otras numerologías a la red con el objetivo de alcanzar menores latencias sobre mayor número de terminales. Además, son necesarios semejantes prefijos cíclicos puesto que los ecos de canal en este tipo de entorno son realmente reducidos.

Por último, sería realmente interesante ayudarnos de femtocélulas de banda milimétrica para densificar aún más la red, puesto que las fábricas gozan de multitud de sensores y maquinaria. Las fábricas son propiedad de empresas privadas, por lo que sería óptimo instalar femtocélulas milimétricas directamente sin emplear la microcélula empleada de 3 GHz. Como bien sabemos toda empresa debe pagar por espectro para usarlo en su fábrica. A diferencia de los operadores que poseen una cantidad de espectro total para usarlo por todo el país, las empresas solo podrán usarlo dentro de su recinto, resultando extremadamente caro adquirir espectro por debajo de la banda milimétrica.

5.2.LÍNEAS FUTURAS

Las estaciones base actuales son mucho más complejas y eficientes que las microcélulas implementadas en el trabajo. En primer lugar, deben gestionar la multiplexación espacial, cualidad no incluida en el simulador y que sin duda aumenta en gran medida los recursos radio, permitiendo mayor capacidad celular y mejores prestaciones.

Otra posible mejora, es el propio planificador o *scheduler*. El algoritmo que gestiona la asignación de recursos radio puede mejorar notablemente en diversas situaciones. La estación base podría gestionar de forma más eficaz sus recursos y evitar así colapsos tan abruptos como los vistos durante la simulación que dejan sin servicio a multitud de usuarios. Además, las últimas tendencias en el desarrollo de planificadores radio incluyen algoritmos de *Machine Learning* e Inteligencia Artificial que permiten gestionar los recursos de forma más eficiente e inteligente.

Otra posible mejora sería optar a distintas numerologías o distancias entre subportadoras, para poder probar otros escenarios y su efectividad en ellos.

Finalmente, en cuanto a los terminales móviles, sería interesante incluir mejoras en el tráfico permitiendo obtener resultados más precisos durante la simulación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ITU-R, “*IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*”, Recommendation ITU-R M.2083, September 2015. [Online] Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf.
- [2] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, “*5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*”, Elsevier, 2nd ed. 2019. [Online] Available: <https://www.elsevier.com>.
- [3] 3GPP “*TR 21.915*”, NR; Protocol Specification (Release 15). April 2019.
- [4] 3GPP “*TR 21.916*”, NR; Enhancement of uRLLC (Release 16). July 2020.
- [5] L. Mendo, “*Mobile Communications*”, ETSIT - UPM. 2021. unpublished.
- [6] Unknown, “*Understanding the 5G NR Physical Layer*”, Keysigh University. 2021. [Online] Available: <https://learn.keysight.com/learn/course/external/view/elearning/29/5g-new-radio-nr-standards>
- [7] José Manuel Riera Salís, “*Evolution towards 5G*”, ETSIT - UPM. 2021. unpublished.
- [8] Javier Hernández Sánchez, “*5G NR Simulator*”, GitHub. 2021. [Online] Available: <https://github.com/javierhersan/5G-NR>

ANEXO A: ASPECTOS ÉTICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES

A.1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones móviles de 5ª generación surgen con el objetivo de mejorar las prestaciones obtenidas por las generaciones antecesoras. En especial, esta nueva generación se centra en la reducción de latencia que abre las puertas a nuevos servicios como la realidad aumentada, control de vehículos no tripulados y un largo número de aplicaciones extra que demanda la sociedad.

Además, esta tecnología tratará de densificar la red con objeto de interconectar IoT masivo a la red, suponiendo un gran avance tecnológico que nos permitirá alcanzar la ansiada *Smart City* o ciudad inteligente, e incluso favorece la proliferación de tecnología inalámbrica en entornos industriales, reduciendo al máximo el cableado en las fábricas.

5G también pretende incrementar o mejorar la banda ancha móvil, ofreciendo tasas binarias extremadamente altas y que son especialmente útiles en el consumo de vídeo de alta definición o en las descargas de grandes archivos.

Esta nueva generación también pretende reducir el consumo energético de toda la red, incluyendo estaciones base, siendo, por tanto, especialmente importante para el cuidado del medioambiente, ya que un menor consumo energético viene acompañado de una reducción en el gasto energético contaminante como combustibles fósiles o derivados.

Además, el tema económico tiene especial importancia, ya que las operadoras y fabricantes de equipos han visto una gran oportunidad de aumentar sus ventas con el despliegue de esta nueva generación.

Por último, no podemos olvidarnos de los aspectos éticos y legales, que sin duda son de gran importancia, entre los cuales encontramos posibles efectos adversos que puede causar sobre la salud humana.

A.2 IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO

El impacto económico y social son sin duda los aspectos que más vamos a percibir en nuestro día a día. Este avance tecnológico traerá de la mano múltiples mejoras y nuevos servicios. Además, las empresas, operadoras y fabricantes aumentarán sus ventas lo cual repercutirá sobre nuestra economía, viéndose incrementado los puestos de trabajo e incluso los salarios.

Aunque el medio ambiente también es uno de los grandes beneficiados, no es un aspecto notable en nuestro día a día. Es cierto que el consumo se ve reducido drásticamente, pero lamentablemente, las comunicaciones móviles no ocupaban un gran porcentaje dentro de nuestras facturas eléctricas. Por lo que el ahorro energético y monetario no será tan notable como se podría esperar.

Sin duda, un aspecto de vital importancia son los efectos adversos sobre la salud humana y que pasaremos a describir en detalle en el siguiente apartado.

A.3 EFECTOS ADVERSOS DE 5G SOBRE LA SALUD HUMANA

En general, los efectos adversos sobre la salud humana son un aspecto de vital importancia, ya que está en riesgo la salud de todos.

Por ello en España, la Ley General de Telecomunicaciones (LGT) 9/2014 es publicada en el BOE de 10 de mayo de 2014, atribuyendo al Estado en su artículo 60 la titularidad y la gestión del dominio público radioeléctrico, incluyendo su planificación, gestión, control y aplicación del régimen sancionador.

Entre las facultades que la LGT en su artículo 61 atribuye al Gobierno para la administración del dominio público radioeléctrico se encuentra su desarrollo reglamentario en forma de Real Decreto. Específicamente, la cláusula a) de este artículo obliga al Gobierno a regular: “El procedimiento de determinación, control e inspección de los niveles únicos de emisión radioeléctrica tolerable y que no supongan un peligro para la salud pública...”

Actualmente, dicha obligación concreta las siguientes normativas:

- El Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre (B.O.E. de 29 de septiembre de 2001) aprobó el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. Se publicaron correcciones de errores en B.O.E. de 26 de octubre de 2001, 16 y 18 de abril de 2002.
- El R.D. 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico (B.O.E. de 8 de marzo de 2017), que establece algunas modificaciones sobre el anterior.
- La Orden Ministerial CTE/23/2002, de 11 de enero (B.O.E. de 12 de enero de 2002), por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones. Esta O.M. desarrolla algunos aspectos del Reglamento.
- La O.M. ITC/749/2010, de 17 de marzo (B.O.E. de 27 de marzo de 2010), por la que se modifica la anterior en aspectos relacionados con las estaciones de baja potencia isotrópica radiada equivalente.

El R.D. 1066/2001 asume los criterios de protección sanitaria frente a los campos electromagnéticos establecidos en la Recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea, de 12 de julio de 1999, recogidos a su vez de la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP).

Del mismo modo, prevé mecanismos de seguimiento de los niveles de exposición mediante la presentación de certificaciones e informes por los operadores de telecomunicaciones, la realización de planes de inspección y la elaboración de un informe anual por parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología (competencia asumida en este momento por el Ministerio de Economía y Empresa).

En cuanto a los niveles de exposición, los límites se establecen en términos de restricciones básicas y niveles de referencia, de acuerdo con las definiciones dadas en el Artículo 1 del Anexo II del Real Decreto:

- Restricciones básicas: Las restricciones a la exposición de los campos electromagnéticos basadas directamente en los efectos conocidos sobre la salud y en consideraciones biológicas. Se utilizan en términos de SAR (*Specific energy Absorption Rate*) y densidad de potencia.
- Niveles de referencia: Se ofrecen a efectos prácticos de evaluación de la exposición, para determinar la probabilidad de que se sobrepasen las restricciones básicas. El cumplimiento del nivel de referencia garantizará el respeto de la restricción básica pertinente. Que el valor medido sobrepase el nivel de referencia no quiere decir necesariamente que se vaya a sobrepasar la restricción básica.

En resumen, la protección de la salud se define en términos de las restricciones básicas, que son las que se relacionan directamente con efectos biológicos conocidos. Sin embargo, a efectos prácticos, pueden utilizarse los niveles de referencia, de comprobación técnica más directa, con la seguridad de que si se respetan se garantiza también el respeto de la restricción básica, que es la relevante en términos biológicos.

En el caso de la emisión de teléfonos móviles y dispositivos similares, que se produce en estrecha proximidad con el cuerpo humano, su efecto debe evaluarse en términos de las restricciones básicas, relacionadas con efectos biológicos. En concreto el parámetro que se utiliza es el índice de absorción específica de energía (SAR), que se define como potencia absorbida por unidad de masa de tejido corporal, cuyo promedio se calcula en la totalidad del cuerpo o en partes de éste, y se expresa en vatios por kilogramo (W/kg).

Los límites derivados de las restricciones básicas se especifican, en el cuadro 1 del artículo 2 del Anexo II del Real Decreto 1066/2001, en [Tabla. A.1](#). Puede comprobarse que, para las frecuencias utilizadas en comunicaciones móviles, los límites de SAR son de 0,08 W/kg en valor medio para cuerpo entero, con valores máximos de 2 W/kg para cabeza y tronco y 4 W/kg para los miembros.

TABLA A.1 - Restricciones básicas para campos electromagnéticos (0 Hz - 300 GHz)

Gama de frecuencia	Inducción magnética (mT)	Densidad de corriente (mA/m ²) rms	SAR medio de cuerpo entero (W/kg)	SAR Localizado (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR Localizado (miembros) (W/kg)	Densidad de potencia S (W/m ²)
0 Hz	40					
>0-1 Hz		8				
1-4 Hz		8/f				
4-1.000Hz		2				
1.000 Hz-100 kHz		f/500				
100 kHz-10 MHz		f/500	0,08	2	4	
10 MHz-10 GHz			0,08	2	4	
10-300 GHz						10

Para las estaciones base de telefonía móvil son de aplicación los niveles de referencia. Se especifican en el cuadro 2, del artículo 3 del Anexo II del Real Decreto 1066/2001, en [Tabla. A.2](#). En las principales bandas de comunicaciones móviles los niveles especificados son 4 W/m² en la banda de 800 MHz, 4,5 W/m² en la banda de 900 MHz, 9 W/m² en la banda de 1800 MHz y 10 W/m² en las banda de 2100 MHz y superiores. Son todos valores RMS imperturbados.

TABLA A.2 - Restricciones de referencia para campos electromagnéticos (0 Hz - 300 GHz)

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μT)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m ²)
0-1 Hz		$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	
3-150 kHz	87	5	6,25	
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

En el caso de coexistencia de emisiones de varias bandas en la misma estación, debe aplicarse una suma ponderada de las mismas, con arreglo a los niveles de referencia de cada banda. Así, si en un punto de medida el nivel de emisiones es del 10% del límite en una banda y del 5% del límite en otra, siendo ambos límites diferentes, en conjunto se tendría un 15% como resultado de la suma ponderada.

Los niveles de referencia deben respetarse en los puntos próximos a las estaciones radioeléctricas donde puedan permanecer habitualmente las personas. En la normativa se establecen los procedimientos con los que, en la planificación de una nueva estación, deben seleccionarse esos puntos, y el estudio previo que debe hacerse sobre el impacto de la nueva estación, incluyendo la necesidad de vallado de ciertas zonas si fuera necesario. Igualmente, en el Real Decreto y la Orden

Ministerial se establecen en detalle los procedimientos necesarios para la inspección y certificación de las nuevas instalaciones.

Cabe resaltar además que los operadores están obligados a entregar, en el primer trimestre de cada año, una certificación redactada por un técnico competente indicativa del cumplimiento de la normativa en el año vencido en sus instalaciones. Los procedimientos de medición y certificación, con una casuística determinada por la zona en que está instalada la estación (urbana o no urbana) y por el nivel de potencia de emisión, están detallados en la Orden Ministerial CTE/23/2002.

El Real Decreto establece suplementariamente algunos criterios que deberán tomarse en consideración en la planificación de nuevas instalaciones, entre los que cabe destacar la utilización de los niveles mínimos de potencia compatibles con la calidad de servicio, evitar la incidencia de la radiación sobre el propio edificio, terrazas o áticos, controlar la emisión sobre espacios sensibles tales como escuelas, centros de salud, hospitales o parques públicos, y controlar la utilización de emplazamientos compartidos con arreglo a las limitaciones de las emisiones.

En cuanto al régimen sancionador, la LGT en su artículo 77 califica como infracción grave “6. Efectuar emisiones radioeléctricas que incumplan los límites de exposición establecidos en la normativa de desarrollo del artículo 61 de esta Ley e incumplir las demás medidas de seguridad establecidas en ella, incluidas las obligaciones de señalización o vallado de las instalaciones radioeléctricas. Asimismo, contribuir, mediante emisiones no autorizadas, a que se incumplan gravemente dichos límites”. Las infracciones graves pueden sancionarse con multas de hasta dos millones de euros.

A.4 CONCLUSIONES

Como hemos visto, el aspecto sanitario es de especial importancia pública, por ello, los estados, en nuestro caso el estado español, limitan la potencia que pueden emitir los terminales de red. Esto impone ciertos límites a los operadores y fabricantes móviles que tendrán que garantizar esos niveles de radiación si no quieren pagar multas millonarias que exceden con creces el millón de euros.

Efectivamente estos límites de potencia limitarán la cobertura de enlace, haciendo que sea distinta en función del país en el que se opere.

No obstante, estos límites están establecidos por un bien común, nuestra seguridad y salud.

ANEXO B: PRESUPUESTO ECONÓMICO

El apartado “Requisitos de las acreditaciones internacionales EUR-ACE y ABET” de la Normativa de TFT de la ETSIT-UPM establece que “*La memoria del TFT del GITST, GIB y MUIT, y en general la de aquellas titulaciones que hayan obtenido o para las que se desee solicitar una acreditación internacional EUR-ACE o ABET, ... debe incluir un presupuesto económico*”. A modo de ejemplo, la tabla del presupuesto de un proyecto podría ser la siguiente:

		horas	Precio/hora	TOTAL
COSTE DE MANO DE OBRA (coste directo)		300	15 €	4,500 €
COSTE DE RECURSOS MATERIALES (coste directo)				
	Precio de compra	Uso en meses	Amortiz. en años	TOTAL
Ordenador personal (Software incluido).....	1,000.00 €	6	5	100.00 €
Impresora láser	- €	6	5	- €
Otro equipamiento	- €	6	5	- €
TOTAL				100.00 €
GASTOS GENERALES (costes indirectos)	15%	sobre CD		690.00 €
BENEFICIO INDUSTRIAL	6%	sobre CD+CI		317.40 €
MATERIAL FUNGIBLE				
Impresión				- €
Encuadernación				- €
SUBTOTAL PRESUPUESTO				5,607.40 €
IVA APLICABLE			21%	1,177.55 €
TOTAL PRESUPUESTO				6,784.95 €