

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE
TECNOLOGÍAS MMW EN ESCENARIOS 5G**
(Model and simulation of mmW technologies
in 5G scenarios)

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Álvaro Fombellida Gobantes

Septiembre - 2019



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Álvaro Fombellida Gobantes

Directores: Luis Francisco Diez Fernández y Ramón Agüero Calvo

**Título: “Modelado y simulación de tecnologías mmW en escenarios
5G”**

Title: “Model and simulation of mmW technologies in 5G scenarios”

Presentado a examen el día: 16 de septiembre de 2019

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Martínez Solórzano, Mar

Secretario (Apellidos, Nombre): Agüero Calvo, Ramón

Vocal (Apellidos, Nombre): García Arranz, Marta

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

Quisiera agradecer, en primer lugar, tanto a Ramón como a Luisco, el haberme dado su voto de confianza para la realización de este trabajo, y haberme apoyado y guiado durante todo el transcurso del mismo. Sin ellos este trabajo no habría podido tener lugar. Además, agradecer también que me hayan facilitado un puesto en el laboratorio donde realizarlo, donde hay un buen ambiente de trabajo.

En segundo lugar, quisiera agradecer a mis compañeros del grado más cercanos, con mención especial a Irene, Íñigo, Diego, Rolando, Iván y Carlos, el haberme acompañado durante todo este camino, ayudándome cuando lo necesitaba y dejándome bonitos recuerdos de nuestro paso por la Universidad.

En último lugar, quisiera agradecer a mi familia, tanto a mis padres, como a mi hermano, como a mis primos y tíos, el haberme dado su continuo apoyo y fuerzas. Comenzaron en el momento de mi decisión de estudiar este grado universitario y no han cesado en ningún momento. Sé que siempre puedo contar con ellos.

Santander, septiembre de 2019.

Álvaro Fombellida Gobantes.

Resumen

La quinta generación de redes móviles, 5G, tiene como objetivos satisfacer una elevada demanda de tráfico proveniente de un gran número de dispositivos conectados simultáneamente y con diferentes necesidades. Para cumplir estos objetivos, surgen nuevas tecnologías, tanto en el ámbito de gestión de la red como en el de la comunicación en el medio radioeléctrico.

Por un lado, estas tecnologías aportan inteligencia a la red mediante la virtualización y centralización de funciones y la creación de redes virtuales para distintos tipos de usuarios conectados.

Por otro lado, aportan un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Este trabajo se centra en la tecnología millimeter-wave, que consiste en el uso de ondas milimétricas para las comunicaciones móviles inalámbricas. Es imprescindible conocer su comportamiento en el medio radio para poder utilizarlas. Para ello, se estudian los modelos de propagación publicados por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones y se implementan en un simulador de redes móviles, para posteriormente evaluar su respuesta en distintos escenarios 5G propuestos. Con estos escenarios se validan, en primer lugar, los modelos de propagación, y después, se analiza el rendimiento de la red con distintas configuraciones de usuarios y celdas.

Summary

The fifth generation of mobile networks, 5G, is aimed at satisfying an elevated traffic demand coming from a significant number of devices simultaneously connected with different necessities. In order to accomplish these goals, new technologies arise, both for network management and communication in the radioelectric means.

On one hand, these technologies provide intelligence to the network, by means of the virtualization and centralization of functions, and the creation of virtual networks for different kind of connected users as well.

On the other hand, these technologies contribute to more efficient usage of the radioelectric spectrum. This thesis is focused on the millimeter-wave technology, which lies in the use of millimetric wavelengths for wireless communications. It is indispensable to know its performance on the radioelectric means for using them. For this purpose, the propagation models published by the European Telecommunications Standard Institute are studied and implemented on a mobile networks' simulator, for afterwards evaluating its response on several 5G scenarios. With these scenarios the propagation models are validated, and then the network performance with different cell and user configuration is analyzed.

Glosario

FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
AMPS	Advanced Mobile Phone System
GSM	Global System for Mobile communications
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
HSPA	High Speed Packet Access
LTE	Long Term Evolution
mmW	Millimeter-wave
WAP	Wireless Application Protocol
IP	Internet Protocol
IoT	Internet of Things
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
SO	Sistema Operativo
MIMO	Multiple Input Multiple Output
C-RAN	Cloud Radio Access Network
3GPP	Third Generation Partnership Project
BBU	Baseband Unit
EHF	Extremely High Frequency
D2D	Device-to-Device
SF	Shadow Fading
UT	User Terminal
O2I	Outdoor-to-Indoor
GWNSyM	Generic Wireless Network System Modeler
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non Line Of Sight
RMa	Rural Macrocell

UMa

Urban Macrocell

UMi

Urban Microcell

InH

Indoor Hotspot

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de una red móvil 5G[8]	2
Figura 2. Esquema de la virtualización de funciones en una red móvil 5G[2]	9
Figura 3. Representación de una red de acceso y distribución millimeter-wave en 5G[7] ..	12
Figura 4. Diagrama del proceso de simulación en GWNSyM	23
Figura 5. Diagrama del escenario A	25
Figura 6. Diagrama del escenario B	26
Figura 7. Diagrama del escenario C	28
Figura 8. Diagrama del escenario D	29
Figura 9. Diagrama del escenario E	30
Figura 10. Resultados de la simulación en el escenario A con la celda <i>RMa</i>	33
Figura 11. Resultados de la simulación en el escenario A con la celda <i>UMa</i>	34
Figura 12. Resultados de la simulación en el escenario A con la celda <i>InH</i>	35
Figura 13. Diagrama del alzado del escenario B	37
Figura 14. Resultados de la simulación 2 en el escenario B	38
Figura 15. Resultados de la simulación en el escenario B con las celdas <i>UMi</i> e <i>InH</i>	39
Figura 16. Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario C con la configuración 1	41
Figura 17. Gráfico de barras de la probabilidad que tiene un usuario de conectarse a cada una de las celdas y del porcentaje del tiempo que los usuarios están conectados a una celda en la simulación 2 del escenario C	42
Figura 18. Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario C con la configuración 2	43
Figura 19. Histograma que representa el porcentaje del tiempo que los usuarios están conectados a una celda en el escenario C con la configuración 2, para cada una de las tres simulaciones (a), (b) y (c)	44
Figura 20. Histograma que representa la probabilidad de que un usuario se conecte a cada celda en el escenario C con la configuración 2, para cada una de las tres simulaciones (a), (b) y (c)	45
Figura 21. Histograma que representa la probabilidad de que un usuario se conecte a cada celda en el escenario C con la configuración 3, para cada una de las tres simulaciones (a), (b) y (c)	46
Figura 22. Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario D	48
Figura 23. Gráfica de la potencia recibida por el usuario en el escenario D	49
Figura 24. Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario E	50
Figura 25. Número medio de usuarios por celda dependiendo del número de celdas en el escenario E	51
Figura 26. Potencia media que reciben los usuarios dependiendo del número de celdas en el escenario E	52
Figura 27. Porcentaje del tiempo que están los usuarios conectados dependiendo del número de celdas en el escenario E	52

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros de entorno para una Macrocela Rural	14
Tabla 2. Parámetros de entorno para una Macrocela Urbana	14
Tabla 3. Parámetros de entorno para una Microcela Urbana	15
Tabla 4. Parámetros de la simulación en el escenario A	32
Tabla 5. Parámetros de la simulación en el escenario B	37
Tabla 6. Parámetros de la simulación en el escenario D	47
Tabla 7. Parámetros de la simulación en el escenario E	50

Tabla de contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivo del proyecto	3
1.2.	Organización de la memoria	3
2.	CONCEPTOS DE REDES CELULARES	5
2.1.	Evolución de las redes móviles	5
2.2.	Quinta generación: 5G	6
2.2.1.	Internet of Things	7
2.2.2.	Network Slicing	7
2.2.3.	Virtualización de funciones de red	8
2.3.	Aspectos teóricos millimeter-wave	10
2.3.1.	Antena millimeter-wave y beam-forming	10
2.3.2.	Millimeter-wave en la red de distribución	11
2.3.3.	Comunicación millimeter-wave entre dispositivos (D2D)	12
2.4.	Modelos de propagación	13
2.4.1.	Macrocela Rural	13
2.4.2.	Macrocela Urbana	14
2.4.3.	Microcela Urbana - Calle	14
2.4.4.	Punto de acceso de interior - Oficina	15
3.	ENTORNO DE DESARROLLO	16
3.1.	Herramienta GWNSyM	16
3.1.1.	Simulación en GWNSyM	17
3.2.	Implementación	18
3.2.1.	Módulo <i>nr-propagation</i>	18
3.2.2.	Módulo <i>nr-entities</i>	20
3.2.3.	Módulo <i>nr-actions</i>	21
3.2.4.	Módulo <i>nr-locator</i>	22
3.2.5.	Escenarios	24
4.	SIMULACIONES Y RESULTADOS	31
4.1.	Simulaciones en el escenario A	31
4.1.1.	Simulación 1. Macrocela en entorno rural	32
4.1.2.	Simulación 2. Macrocela en entorno urbano	34
4.1.3.	Simulación 3. Picocelda en entorno de interior	35
4.2.	Simulaciones en el escenario B	36
4.2.1.	Simulación 1. Una sola celda	38
4.2.2.	Simulación 2. Dos celdas	39
4.3.	Simulaciones en el escenario C	40
4.3.1.	Configuración 1. 7 celdas <i>UMa</i>	40
4.3.2.	Configuración 2. 1 celda <i>UMa</i> y 6 <i>UMi</i>	43
4.4.	Simulaciones en el escenario D	46
4.5.	Simulaciones en el escenario E	48

5. CONCLUSIONES	53
5.1. Líneas futuras.....	54
BIBLIOGRAFÍA	56
APÉNDICE	58

1 Introducción

Durante las últimas décadas, las redes móviles han evolucionado a gran velocidad. Este ritmo se mantiene en la actualidad y la tendencia indica que lo va a seguir haciendo en los próximos años. Se está produciendo el despegue de una nueva generación de redes móviles: la quinta generación, la cual en adelante es referida como 5G. De esta tecnología se espera que satisfaga requisitos muy exigentes, entre los que se encuentra dar servicio a un número muy elevado de dispositivos por área, cada uno con características y necesidades de red muy diferentes, pudiendo demandar anchos de banda del orden de los Gbps.

Para que 5G pueda hacer frente a estos requisitos mencionados en el párrafo anterior necesita la implementación de una serie de tecnologías habilitadoras. Las más importantes se enumeran a continuación, junto con un breve comentario de las mismas[8]:

- Redes ultra densas. Para aumentar la capacidad al mismo tiempo que la cobertura, se necesita desplegar más antenas por área. En redes densificadas la distancia usuario-celda es menor, por lo que se reducen las pérdidas por propagación. Por otro lado, también aumenta la interferencia, lo que puede suponer una degradación de la calidad de servicio, por lo que es importante minimizar su impacto.
- Tecnologías millimeter-wave y ópticas para la comunicación inalámbrica. Las tecnologías actualmente en uso no soportan la alta capacidad a la que tiene que hacer frente 5G. Son necesarias otras que trabajen en bandas de frecuencia menos congestionadas y que ofrezcan mayor ancho de banda.
- Tecnologías massive MIMO. La utilización de múltiples antenas y técnicas de multiplexado y diversidad permiten aumentar la eficiencia y fiabilidad de un enlace inalámbrico. Juegan un papel importante en combinación con millimeter-wave.
- Tecnologías de Acceso Múltiple No Ortogonal (NOMA). Estas tecnologías permiten aumentar la eficiencia espectral de un canal manteniendo ancho de banda. Tiene varios modos de aplicación, uno de ellos es la transmisión a dos usuarios por el mismo canal asignando más potencia al usuario que peores condiciones espectrales tiene.
- Acceso a espectro dinámico. Esta técnica se aprovecha de ventanas temporales o frecuenciales en el espectro de otras tecnologías utilizándolas para transmitir sin in-

terferir a éstas. Esta técnica es clave para la comunicación directa entre dispositivos (D2D).

5G introduce grandes cambios, tanto en la topología de la red como en el acceso a los recursos. Entre estos cambios se encuentra la utilización de bandas frecuenciales mucho más altas con respecto a las generaciones anteriores. En este nuevo conjunto de frecuencias se pueden encontrar portadoras desde los 500 MHz hasta 300 GHz[1]. En este rango están incluidas las ondas millimeter-wave, de cuyas propiedades se puede sacar mucho beneficio en términos de capacidad. Estas bandas frecuenciales posibilitan aumentar enormemente la cantidad de antenas desplegadas y el número de usuarios a los que se puede dar servicio. También acarrear problemas, como las pérdidas por propagación o la interferencia, que la tecnología 5G debe abordar y solucionar mediante el uso de nuevas técnicas.

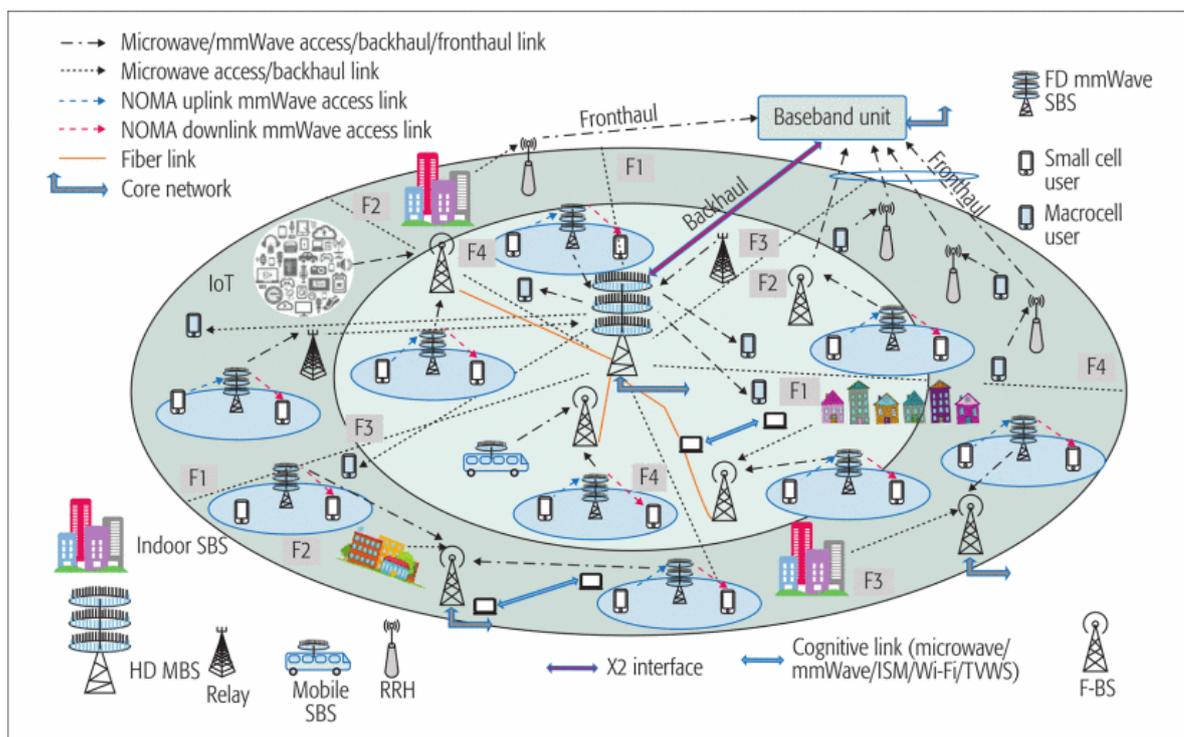


Figura 1: Esquema de una red móvil 5G[8]

La solución que se obtiene integrando los objetivos que debe cumplir 5G es una red heterogénea y versátil. En la figura 1 [8] se observa un esquema general de una red móvil 5G con distintos tipos de estaciones base, dispositivos y enlaces entre ellos. En capítulos posteriores se comentan las características más importantes que componen esta red heterogénea.

En resumen, 5G promete unas redes móviles de gran capacidad, cobertura, fiabilidad, versatilidad y latencia muy baja. Para cumplir estos requisitos, la tecnología millimeter-wave, entre otras, juega un papel muy importante.

1.1. Objetivo del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, los estándares 5G introducen el uso de bandas frecuenciales altas y nunca antes utilizadas en el área de comunicaciones móviles. El objetivo de este trabajo es la implementación y análisis de modelos que incluyan comunicaciones en estas bandas, que puedan ser posteriormente utilizados para el desarrollo de técnicas de gestión de recursos. Para ello, primero se deben programar los modelos de propagación radio en la herramienta de simulación concreta que se va a utilizar, lo que constituye el primer objetivo. El segundo objetivo consiste en validar que los modelos de propagación programados se comportan de manera coherente, y los resultados que se obtienen a través de ellos son válidos. Por último, el tercer objetivo consiste en utilizar la herramienta de simulación con los modelos de propagación y escenarios ya validados para analizar el rendimiento de estos últimos variando distintos parámetros, como puede ser el número de celdas, el número de usuarios o la posición de los mismos.

A modo de resumen, los objetivos de este proyecto se enumeran a continuación.

- Incorporación de la tecnología millimeter-wave a la herramienta de simulación utilizada.
- Validación de los modelos de propagación en los escenarios propuestos.
- Análisis del rendimiento de la red con diferentes configuraciones de escenarios.

1.2. Organización de la memoria

Tras presentar la motivación del trabajo, el resto de la memoria se estructura como sigue. En el Capítulo 2 se presenta de forma breve la evolución de las redes móviles, como contexto para después presentar de forma más extensa los aspectos principales de la tecnología. Se incluye una parte en la que están contenidos los aspectos teóricos millimeter-wave, ya que

son un punto clave de los recursos radio en 5G, y otra en la que se encuentran los modelos de propagación utilizados para las simulaciones. En el Capítulo 3 se describe el entorno de desarrollo de este proyecto. Se comienza con un análisis de dicho entorno y se continúa con una descripción de la implementación de los distintos elementos que se han implementado en este trabajo. Posteriormente, en el Capítulo 4 se describen los diferentes escenarios que se han analizado para después evaluar los resultados obtenidos de los mismos. Para finalizar, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones y las posibles líneas futuras que pueden desembocar de este proyecto.

2 Conceptos de redes celulares

Como se ha mencionado anteriormente, en este capítulo se comentarán los aspectos más relevantes de las tecnologías celulares. En primer lugar se describirá la evolución tecnológica hasta llegar a la actualidad, para, posteriormente, enumerar las características técnicas más relevantes de la tecnología 5G. En este sentido, se prestará especial atención a las posibilidades que brinda la comunicación basada en ondas milimétricas. Finalmente, se detallarán algunos conceptos teóricos relevantes para la elaboración del trabajo, en concreto los referentes a los modelos de propagación implementados.

2.1. Evolución de las redes móviles

Para comprender hacia dónde se dirige 5G, se debe primeramente conocer la evolución de las redes móviles. A continuación se enumeran las cuatro generaciones de redes móviles que preceden a 5G, mencionando las principales características de cada una.

- Primera generación: 1G. Años 1980. Sistema de comunicación inalámbrica analógica, en la banda de 800 MHz. Utiliza FDMA como mecanismo de acceso al medio inalámbrico y cada canal tiene un ancho de 30 kHz. Utiliza el estándar AMPS. Su único servicio son las llamadas y no permite realizar traspasos (*handovers*) entre estaciones base.
- Segunda generación: 2G (GSM). Años 1990. Primer sistema de comunicación móvil digital, en las bandas de 850 y 1900 MHz con portadoras de 200 kHz. En este caso el acceso al medio se basa en TDMA. Introduce variedad de servicios complementarios a las llamadas, como SMS, roaming internacional, identificación de llamadas o tarificación en tiempo real. En el año 2000 se introduce la transmisión de datos a 115 kbps con el estándar GPRS y posteriormente a 384 kbps con EDGE.
- Tercera generación: 3G (UMTS). Años 2000. Se crea el 3GPP y se estandariza la estructura de red con el estándar IMT-2000. Se accede al medio mediante WCDMA, con portadoras de 5 MHz (espectro ensanchado) y velocidades de hasta 2 Mbps. Después mediante HSPA se mejora el aprovechamiento de los recursos radio pudiendo

llegar a velocidades de 128 Mbps en el enlace de bajada al usuario. Aparecen los primeros *smartphones*, dispositivos en los cuales las llamadas pasan de ser la función casi única y principal a ser una función más, tomando gran importancia las tarifas con bonos de datos para navegar por internet.

- Cuarta generación: 4G (LTE). Años 2010. Con el estándar LTE se accede al medio mediante OFDMA con portadoras de 180 kHz permitiendo velocidades de entre 150 y 300 Mbps. En LTE la comunicación es orientada a paquetes, lo que dificulta cursar llamadas por el método tradicional de conmutación de circuitos, debiendo estas cursarse por IP. Esto genera un problema, y es que si durante una llamada en 4G el usuario entra en una zona donde sólo hay 3G, no es posible realizar un traspaso (al ser la llamada IP) y esta se cae. Es por eso que, al menos en España, 4G no cursa llamadas, sólo datos móviles. Entre la alta velocidad de transmisión 4G y la evolución de los *smartphones* (cada vez más potentes, con mejores pantallas y cámaras) se ha disparado el consumo de datos móviles por los usuarios, y las compañías han ido ofreciendo tarifas cada vez mayores, incluso ofreciendo datos ilimitados para algunos servicios como las redes sociales.

2.2. Quinta generación: 5G

En la evolución de las redes móviles desde 2G hasta 4G se puede apreciar que los servicios han ido enfocados al mismo tipo de dispositivo: el teléfono móvil. Bien es cierto que estos dispositivos se han ido modernizando, pero en términos generales lo que se ha aumentado con cada generación ha sido el ancho de banda para transmisión de datos del que dispone cada usuario. El terminal de usuario ha sido el mismo con la diferencia de que al principio los requisitos de comunicación de datos eran bajos, con servicios tales como consultar el correo electrónico o acceder a una WAP, y después esa capacidad ha aumentado, como puede ser la necesaria para una transmisión de vídeo de alta calidad o una videollamada. Estos altos flujos de tráfico van a Internet y hasta 4G la red no proporciona mucha flexibilidad. 5G introduce funciones que añaden inteligencia a la red permitiéndola adaptarse al tipo de usuarios que generan tráfico. En los siguientes puntos se explican algunas de estas funciones.

2.2.1. Internet of Things

5G ha sido pensado para dar servicio a tipos de dispositivos más allá del teléfono móvil. Esto va de la mano con el concepto de Internet Of Things (IoT), que se refiere a que muchos dispositivos electrónicos van a incorporar conexión a Internet. Un sensor de aparcamiento, una máquina expendedora, un coche autónomo... Cada uno de estos dispositivos tiene unas necesidades de tráfico y recursos radio distintos.

Por ejemplo, el sensor de aparcamiento necesita que su antena consuma muy poca energía, mientras que en ancho de banda o retardo no tiene grandes restricciones. La máquina expendedora no tiene restricción de consumo energético pero necesita un ancho de banda suficiente para cargar su SO al arrancar y enviar actualizaciones periódicas de abastecimiento. El coche autónomo, por otra parte, necesita una latencia muy baja y una fiabilidad de la conexión muy alta, ya que si esta se cae podría causar un accidente o detener la circulación en una autovía.

5G contempla estos casos, entre otros, y los satisface combinando nuevas técnicas como las que se comentan a continuación.

2.2.2. Network Slicing

Una de las características que tiene 5G para adaptarse a la heterogeneidad de la red es *Network Slicing*. Esta técnica consiste en la división de la red física en varias redes virtuales denominadas *slices*. Cada *slice* es independiente de los demás y tiene su propia configuración (de acceso radio, de gestión de recursos, de calidad de servicio...) y sus propios servicios. Esto permite adaptar totalmente tanto los recursos radio como los de red a los distintos tipos de usuarios de 5G. Se pueden crear *slices* para comunicación IoT (Internet of Things), V2I (vehicle-to-infrastructure), smartphones con distinta demanda (un *slice* para un estado de reposo y otro para un estado de alto flujo de transmisión de datos), servicios de emergencia, etc. Incluso los operadores pueden compartir su infraestructura de red física y separar a sus usuarios en *slices*, acordando el reparto de recursos radio y de red. Esta técnica también aporta seguridad y robustez a la red. Por un lado, si un *slice* es hackeado, el ataque no traspasa ni afecta a los demás *slices*, que seguirían funcionando. Por otro lado, si un *slice* de una celda se satura por una demanda alta de tráfico, los demás siguen dando servicio con normalidad

(útil para los servicios de emergencia). También se puede programar prioridad entre *slices* acorde con sus configuraciones, para garantizar que se cumpla la calidad de servicio.

2.2.3. Virtualización de funciones de red

Otra de las técnicas con las que 5G pretende cumplir los objetivos propuestos es la virtualización de funciones en red. Mediante esta tecnología se alejan ciertas funciones de la red de acceso llevándolas al core de la red, donde se procesan de forma centralizada.

Las técnicas usadas en 5G deben ser muy eficientes en cuanto a uso del espectro, consumo de energía y coste de cómputo. También deben ser escalables al alto número de dispositivos conectados y versátiles a distintas topologías de red.

En 5G se propone un modelo Cloud-RAN (Cloud Radio Access Network), en el cual las celdas están formadas sólo por antenas que carecen de inteligencia y se conectan mediante fibra óptica a varios pool de recursos donde se encuentran las funciones virtualizadas. Las funciones que requieran una respuesta en tiempo real se virtualizan en pools cercanos al extremo de la red, mientras que las funciones que acarrearán más coste computacional lo hacen en el core. De esta forma también se balancea la carga global de la red, repartiéndola dinámicamente según la demanda en cada momento [2].

En la figura 2 se muestra un esquema Cloud-RAN propuesto por el 3GPP en el que aparecen funciones virtualizadas en dos grupos. Por un lado, están los servidores encargados de las funciones de control (*control plane virtual resource pool*), entre las que se encuentran:

- Monitorización y gestión remota de celdas.
- Control de portadoras.
- Control de la conexión.
- Configuración de medidas de las celdas.
- Asignación de recursos.

Por otro lado se encuentran los servidores que se encargan de las funciones de procesamiento de señal banda base (*virtual BBU resource pool*), que incluyen:

- Estimación del canal, Transformada de Fourier (filtrado digital), decodificación.

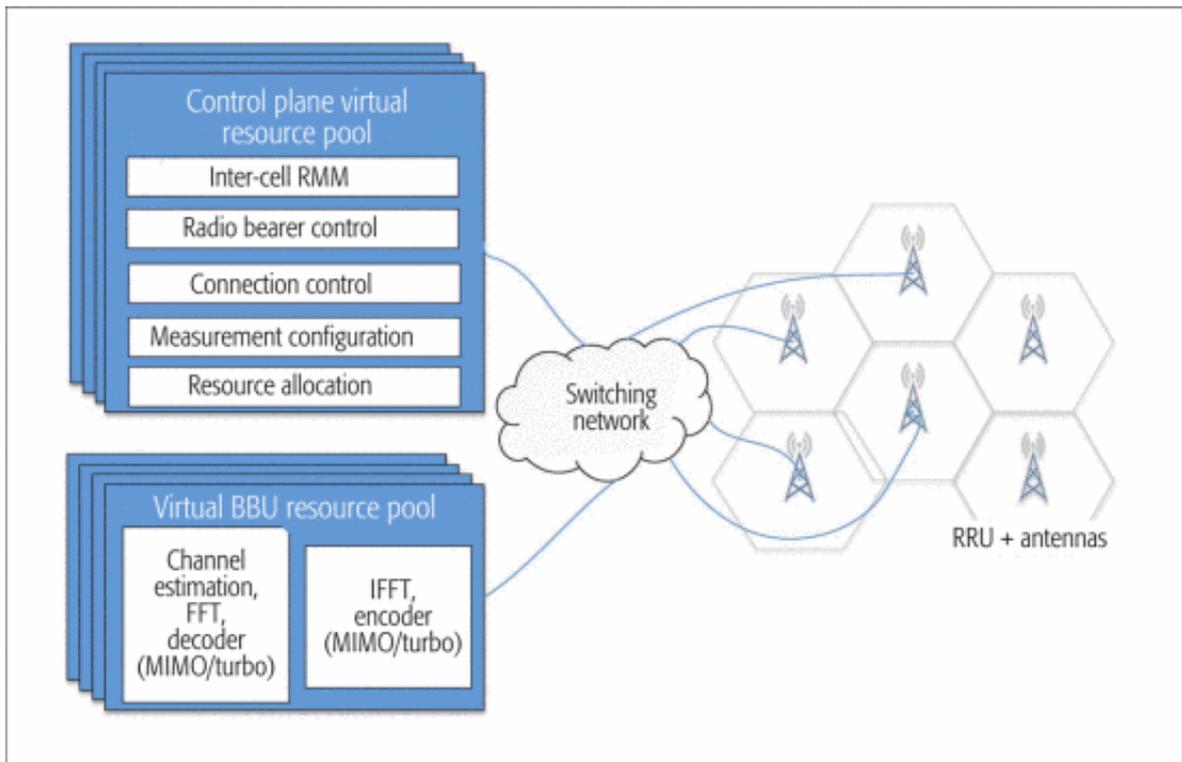


Figura 2: Esquema de la virtualización de funciones en una red móvil 5G[2]

- Transformada Inversa de Fourier, codificación.

Dado que las arquitecturas C-RAN requieren despliegues de fibra, pueden resultar no asumibles en ciertos escenarios. Por ello, en los últimos años están apareciendo diferentes propuestas que permitan seleccionar de forma más o menos dinámica (*functional-split*) qué funciones son virtualizadas y cuáles permanecen junto al punto de acceso inalámbrico.

Una función de red virtualizada se ejecuta en un servidor central específico para esa función. Este servidor está optimizado para llevar a cabo la tarea de forma óptima y eficiente. De esta forma se alivia la carga en el extremo de la red, se mejora la coordinación entre elementos de acceso y se puede, incluso, reducir su tiempo de respuesta. Un ejemplo de una función de red virtualizada es el procesamiento de la señal en un entorno massive MIMO. Mediante la virtualización del procesamiento de la señal, se puede llevar a cabo un procesamiento más preciso, lo que aumenta la eficiencia espectral y energética de las celdas. El software analiza y aplica algoritmos sobre las señales de una misma zona y las prepara de manera que se transmiten con la mínima interferencia y con el máximo aprovechamiento del espectro disponible. Se

agiliza la tarea, ya que se reduce la sobrecarga de señalización y se responde con un retardo muy bajo. De esta forma también se puede reducir la potencia de transmisión, lo que ahorra energía y produce beneficios como alargar la vida de la batería de los usuarios. También el software se adapta al tipo de usuario o de topología de la red con la que trabaja, lo que aporta escalabilidad y versatilidad.

2.3. Aspectos teóricos millimeter-wave

Las técnicas mencionadas anteriormente deberán acomodarse a las diferentes tecnologías de radio-comunicaciones que se desplieguen. En concreto en 5G se prevé que el uso de bandas milimétricas permitirá hacer frente a los requisitos de alta capacidad de comunicaciones. Se consideran ondas milimétricas a aquellas que se encuentran en la banda de frecuencia EHF, entre 30 y 300GHz. En términos de longitud de onda el rango se encuentra entre 1 cm y 1 mm. Esta banda, además de ofrecer un enorme ancho de banda, dispone de propiedades interesantes que se pueden aprovechar para las comunicaciones móviles 5G. También acarrea un alto nivel de atenuación comparado con las bandas de frecuencias más bajas de las generaciones móviles anteriores. A continuación se plantea la forma en la que se optimiza el uso de estas ondas en las redes móviles 5G.

2.3.1. Antena millimeter-wave y beam-forming

El tamaño de las antenas transmisoras y receptoras de señales debe ser del orden de la mitad de la longitud de onda que transmiten. Por lo que una antena millimeter-wave debe tener un tamaño del orden de los milímetros. Esto permite sustituir la antena convencional de comunicaciones móviles por una matriz de pequeñas antenas. Esta matriz de antenas está representada en la figura 7.3-1 del documento anexo.

Variando la fase de transmisión de la señal en cada antena, se consigue que se produzcan interferencias constructivas en una dirección determinada y destructivas en el resto de direcciones. Así se genera cada *beam* o haz de señal.

Un gran problema de las comunicaciones a estas frecuencias es la alta atenuación que sufre la señal. La técnica *beam-forming* reduce enormemente los efectos de este problema. Por una

parte, concentra casi toda la potencia de señal en el lugar en el que está situado el usuario. Por otra, reduce la interferencia co-canal entre usuarios de diferentes *beams*, ya que cada usuario recibe muy poca potencia de los *beams* de otros usuarios.

De esta manera, la técnica *beam-forming* consigue aumentar en gran medida la relación señal-ruido que recibe cada usuario en comparación con la que recibiría sin el uso de la misma.

Dependiendo de la configuración de la celda y las características del entorno, un *beam* puede agrupar a uno o varios usuarios. Los usuarios pueden realizar traspasos entre *beams* de una misma celda, o con *beams* de celdas adyacentes. Además, gracias a la virtualización de las funciones de control, un usuario puede estar conectado a dos *beams* a la vez de distintas celdas. Esta técnica se llama conectividad dual, y permite al usuario disponer de un enlace con la red de mayor calidad y robustez. Además, con esta técnica se pueden realizar *soft-handover* en los que el usuario, antes de cambiar de celda, pasa un tiempo conectado a dos celdas a la vez, por lo que el cambio se realiza de manera más segura.

La matriz de antenas está presente tanto en la estación base como en el usuario. Esto aporta a ambos diversidad espacial, lo que mejora la recepción de la señal. Mediante el análisis de las diferencias de potencia y fase de la señal recibida, se calcula la dirección de la que viene la señal y se ajusta la transmisión de la respuesta. De esta forma se crean los *beams* y se modifican dinámicamente según la posición de la antena de la celda y de los usuarios [5].

2.3.2. Millimeter-wave en la red de distribución

Para 5G se propone una infraestructura de la red de distribución (*backhaul*) radio basada en millimeter-wave. Esta infraestructura se compone de dos niveles. El primero está formado por macroceldas que tienen conexión cableada con la red troncal. El segundo nivel está formado por picoceldas que dan acceso a la red a los usuarios.

Las conexiones entre ambos niveles y los usuarios se realizan a través de enlaces millimeter-wave, donde se distinguen varios tipos que se enumeran a continuación.

- Enlaces de distribución. Estos enlaces interconectan las picoceldas entre ellas y con

las macroceldas, formando una red de distribución radio. Por estos enlaces fluye gran cantidad de tráfico que va dirigido a otro punto de la red de distribución o la red troncal a través de las macroceldas. Deben ser enlaces de alta frecuencia, ya que necesitan alta capacidad para transmitir el tráfico agregado de los usuarios.

- Enlaces de acceso. Estos enlaces conectan a los usuarios finales con las picoceldas, formando la parte de acceso a la red. Estos enlaces se pueden situar en la parte de baja frecuencia del espectro millimeter-wave, ya que ahí su capacidad es suficiente para la demanda de un usuario y la atenuación es más baja.

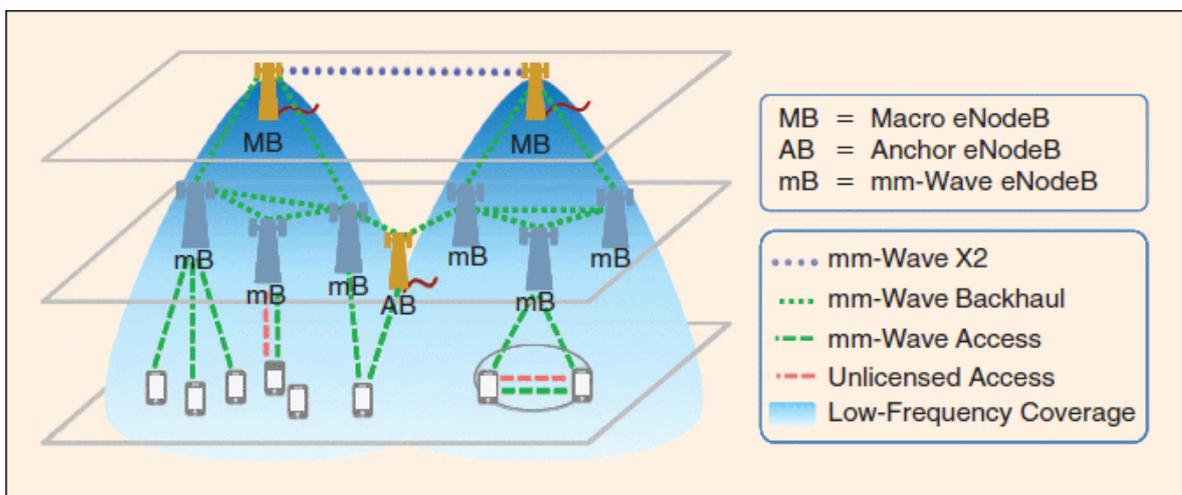


Figura 3: Representación de una red de acceso y distribución millimeter-wave en 5G[7]

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de un escenario con los dos niveles que se han mencionado anteriormente, que son los dos superiores, encontrándose en la parte inferior el nivel de los usuarios. El color azul oscuro indica enlaces de mayor frecuencia y se va degradando a medida que se acerca al nivel del usuario, donde la frecuencia es más baja por los motivos que se han comentado anteriormente. En dicha figura también se aprecia un enlace directo entre dos usuarios. En el punto siguiente se habla de este tipo de comunicación [7].

2.3.3. Comunicación millimeter-wave entre dispositivos (D2D)

La tecnología millimeter-wave permite comunicaciones directamente entre dispositivos. Su uso es especialmente interesante en esta banda de frecuencia ya que el espectro es amplio y permite crear enlaces de alta capacidad. Las comunicaciones entre dispositivos en el ámbito

5G toman importancia con IoT, ya que mucha información de estos dispositivos es generada y consumida localmente. Mediante D2D se reduce el camino que recorre esta información, ahorrando transmisiones y energía a los dispositivos y carga a la infraestructura de red móvil. El principal problema de esta comunicación es la interferencia. Este problema se minimiza mediante la aplicación de *beam-forming*. Se establece un *beam* entre los dos usuarios que intercambian información, evitando interferir con otros. La atenuación no supone un gran problema ya que estas comunicaciones se realizan a corto alcance, entre usuarios cercanos [6].

2.4. Modelos de propagación

Para este proyecto se utilizan los modelos de propagación publicados por el Instituto Europeo de las Normas de Telecomunicaciones en el documento *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*[1] que se encuentra en el Anexo I. A continuación se explican los tipos de celda que se encuentran en el modelo. En el apartado 7.4 del anexo mencionado se encuentra información más técnica sobre los modelos.

En el modelo de propagación se distinguen 4 tipos de celda. Cada una tiene sus fórmulas de cálculo de pérdidas por propagación, tanto para el caso en el que se da línea de vista entre emisor y receptor como para el que no. La probabilidad de línea de vista se especifica para cada tipo de celda. También se especifica la desviación típica de la variable aleatoria que se utiliza para calcular los desvanecimientos *Shadow Fading*.

2.4.1. Macrocelda Rural

El modelo para esta celda que se da en el documento anexo se ha calculado en base a un entorno rural, donde la altura media de los edificios es de 5 metros y la anchura media de las calles de 20 metros. Los parámetros que se deben cumplir en un escenario para aplicar este modelo se muestran en la tabla 1. Además, la frecuencia de portadora en esta celda no debe ser superior a los 7 GHz, y el usuario debe estar posicionado como mínimo a 35 metros de la celda.

Tabla 1: Parámetros de entorno para una Macrocela Rural

Variable	Letra	Rango	Valor por defecto
Altura de la antena de la celda	h_{bs}	$10 \leq h_{bs} \leq 100$ metros	35 metros
Altura de la antena del UT	h_{UT}	$1 \leq h_{UT} \leq 10$ metros	1.5 metros
Altura media de los edificios	h	$5 \leq h \leq 50$ metros	5 metros
Anchura media de la calle	W	$5 \leq W \leq 50$ metros	20 metros
Desviación típica SF	σ_{SF}	4, 6, 8	-

Tabla 2: Parámetros de entorno para una Macrocela Urbana

Variable	Letra	Rango	Valor por defecto
Altura de la antena de la celda	h_{bs}	$h_{bs} = 25$ metros	25 metros
Altura de la antena del UT	h_{UT}	$1.5 \leq h_{UT} \leq 22.5$ metros	1.5 metros
Desviación típica SF	σ_{SF}	4, 6	-

2.4.2. Macrocela Urbana

El modelo para esta celda que se da en el documento anexo se ha calculado en base a un entorno urbano. En la tabla 2 se especifican los parámetros del escenario en el que se puede aplicar este modelo. Como ocurre con el modelo anterior, en este el usuario también debe estar posicionado a 35 metros como mínimo de la celda.

2.4.3. Microcela Urbana - Calle

El modelo para esta celda que se da en el documento anexo se ha calculado en base a un entorno urbano, denominado en el documento como *Street Canyon*. Consiste en una calle estrecha con edificios a ambos lados, donde los usuarios pueden estar tanto fuera como dentro de los edificios. El modelo contiene una sección de pérdidas O2I (outdoor-to-indoor) que debe tenerse en cuenta para los usuarios que se encuentran dentro del edificio. La hilera de edificios se asume regular y uniforme, de tal manera que se puede ver como una única pared detrás de la cual se encuentra el interior del edificio. En la tabla 2 se especifican los parámetros del escenario en el que se puede aplicar este modelo.

Tabla 3: Parámetros de entorno para una Microcelda Urbana

Variable	Letra	Rango	Valor por defecto
Altura de la antena de la celda	h_{bs}	$h_{bs} = 10$ metros	10 metros
Altura de la antena del UT	h_{UT}	$1.5 \leq h_{UT} \leq 22.5$ metros	1.5 metros
Desviación típica SF	σ_{SF}	4, 7.82, 8.2	-

2.4.4. Punto de acceso de interior - Oficina

El modelo para esta celda que se da en el documento anexo se ha calculado en base a un entorno de interior, como puede ser una oficina. En este caso la altura a la que deben estar las antenas es de 1 metro para la del usuario y de 3 metros para la de la celda. También se dan las distancias mínima y máxima entre estas antenas, siendo la mínima de 1 metro y la máxima de 100 metros cuando hay LOS y de 86 metros cuando no hay. No hay distancia mínima entre el usuario y la celda.

3 Entorno de desarrollo

En este capítulo se presenta, en una primera sección, la herramienta de simulación que se ha utilizado en este trabajo, para después, en una segunda, detallar la implementación que se ha realizado sobre la misma.

3.1. Herramienta GWNSyM

La plataforma utilizada para el desarrollo de este trabajo se denomina *Generic Wireless Network System Modeler*, en adelante GWNSyM[4]. Es un simulador de redes que permite desplegar distintas topologías de redes móviles y operar sobre ellas para así analizar su comportamiento. Dentro de los simuladores de topologías de red, se distinguen tres tipos: simuladores a nivel de red, simuladores a nivel de enlace y simuladores a nivel de sistema. Los simuladores a nivel de red incorporan los protocolos de comunicación, de manera que generan y transmiten todos los bits que habría en una comunicación real. Esto aumenta la precisión de las mediciones pero también el tiempo de simulación debido a la cantidad de cálculos necesarios para llevarla a cabo. Las simulaciones de este tipo son realizables para topologías sencillas, pero se vuelven irrealizables a medida que crecen los componentes o la complejidad del sistema. Los simuladores a nivel de enlace se centran en la transmisión de la señal por el medio físico típicamente incluyendo solo un par receptor-transmisor, teniendo en cuenta modulación, frecuencia, desvanecimientos, posibles reflexiones y otros parámetros del medio radio. Al igual que sucede con el caso anterior, estas simulaciones ofrecen un alto nivel de precisión en la capa en la que se centran, pero no permiten modelar servicios ni proporcionan información sobre el rendimiento esperado de sistemas completos. Los simuladores a nivel de sistema proveen una visión más global, simplificando la transmisión de señales por el medio físico y los protocolos de comunicación por la red, y utilizando modelos matemáticos o estadísticos. Esto implica cierta pérdida de precisión, tanto en el enlace físico como en la comunicación por protocolo, pero a cambio permite evaluar sistemas con un gran número de dispositivos de distintos tipos y con un gran número de realizaciones por simulación. Dentro de este tipo de simuladores se encuentran dos subtipos: estáticos y dinámicos. En los estáticos las realizaciones son independientes entre sí. Esto quiere decir que lo

que ocurra en una realización no afecta a la siguiente. En cambio, en los dinámicos sucede al revés. Lo que ocurra en una realización tiene en cuenta lo que ha sucedido en las anteriores [3].

GWNSyM es un simulador a nivel de sistema genérico que permite tanto simulación estática como dinámica. Está programado en C++ y hace uso de abstracciones genéricas para modelar el sistema: tipos y acciones. Un tipo es un elemento de red, como un usuario o una celda. Una acción es un conjunto de operaciones que se realizan sobre uno o varios tipos. Los tipos se pueden crear de manera jerárquica, haciendo que cada uno de ellos pueda tener subtipos de manera recursiva. En la siguientes secciones se explica cómo se realizan las simulaciones y cómo se ha implementado el código del programa.

3.1.1. Simulación en GWNSyM

Dentro de la herramienta de simulación se han implementado modelos de canal de mmW, para las cuales se han asumido ciertas simplificaciones. Por un lado, se asume que existe un *beamforming* perfecto entre las celdas y los usuarios, de manera que estos últimos reciben la señal de cada celda directamente dirigida hacia ellos sin interferencias de otros usuarios o celdas. Al no haber interferencia, la única degradación de la señal es producida por la propagación en el aire. De esta forma, la potencia recibida por cada usuario es independiente del resto.

A través de esta herramienta se obtienen datos en bruto, que después se importan al software MatLab para ser procesados, filtrados y representados en gráficas.

En los siguientes párrafos se detalla el proceso de simulación en la herramienta de trabajo. Al comenzar, se crea el objeto sistema, el cual se utiliza durante todo el programa. Después se instancian los tipos, haciendo referencia a las clases que los definen. A continuación se carga la configuración global y se despliega la red. En dicha configuración está contenido el número de realizaciones que se van a ejecutar, así como el número de elementos de cada tipo que se van a desplegar. Se denomina fotografía al ciclo de realización de todas las acciones definidas. Una versión más detallada del procedimiento de simulación se puede encontrar en [3].

Una vez está la red desplegada el programa está listo para comenzar a realizar las acciones. Dentro de las acciones hay tres grupos: las acciones de simulación, las inicializadoras y las finalizadoras. Estas dos últimas, como sus nombres indican, son acciones que sólo se ejecutan una vez, al principio y al final de la simulación, respectivamente. Primero se ejecutan las acciones inicializadoras, en el orden en el que se han indicado. Posteriormente, para cada una de las fotografías se ejecutan las acciones de simulación de forma secuencial. De este modo, cuando se llega a la última se ha completado una fotografía. Se vuelve a repetir el proceso (esta vez sin las acciones inicializadoras), hasta que se llega al número de fotografías establecido en la configuración. Por último se ejecutan las acciones finalizadoras y termina el programa.

En el siguiente apartado se detalla la implementación realizada, tanto de los tipos como de las acciones.

3.2. Implementación

Como ya se ha mencionado anteriormente, toda la implementación ha sido realizada en el lenguaje de programación *C++*. Analizando la forma y el contenido del código se distinguen cuatro módulos, que se describen en los siguientes apartados. Primero se presenta el módulo *nr-propagation*, el cual contiene los modelos de propagación que utiliza el simulador. A continuación se muestra el módulo *nr-entities*, donde se definen los tipos que se despliegan en los escenarios. Seguidamente se encuentra el módulo *nr-actions*, que contiene las acciones que se realizan en las simulaciones. Por último se presenta el módulo *nr-locator*, en el cual se incluyen funciones de posicionamiento de elementos en los escenarios.

3.2.1. Módulo *nr-propagation*

Este ha sido el primer módulo que se ha programado, ya que es el más importante en este proyecto y necesario para ejecutar cualquier simulación. En él se han recogido los modelos de propagación de señales de frecuencia entre 0.5 y 100 GHz[1] en el contexto de comunicaciones móviles 5G y que se reproducen en el Anexo I. Estos modelos se encuentran en el apartado 7.4 del documento, e incluyen las pérdidas por propagación, la probabilidad de

línea de vista y la penetración en edificios.

Este módulo se ha dividido en funciones, al igual que los modelos están separados en apartados.

En primer lugar, se encuentran las fórmulas de cálculo de pérdidas por propagación, en adelante *pathloss*, separadas en los 4 tipos de celdas que se han explicado en el apartado 2.4. Dentro de cada uno de estos, se distinguen los casos en los que se produce línea de vista (LOS) entre antenas y los casos en los que no se produce (NLOS). Se ha creado una función separada para cada caso LOS y NLOS de cada tipo de celda. Para facilitar tanto la lectura del código como la llamada y posible modificación de las funciones.

En segundo lugar, se han programado las funciones de probabilidad de LOS. Se ha dividido cada tipo de celda en una función, al igual que en el caso anterior. Estas funciones sólo reciben un parámetro, que es *dist2Din* para el caso *InH* y *dist2Dout* para los casos *RMa*, *UMi* y *UMa* a excepción de este último que también recibe *hUT*. Los parámetros *dist2Din* y *dist2Dout* representan la distancia en el interior y en el exterior, respectivamente, en el eje horizontal entre el usuario y la celda. La distancia interior es la distancia entre el usuario y la pared del edificio en el que se encuentra, y la exterior es aquella comprendida entre dicha pared y la celda. Si el usuario no se encuentra en el interior de un edificio, la distancia interior es 0 y la exterior es la distancia total. El parámetro *hUT* representa la altura de la antena del usuario. Estos parámetros son de los que depende el cálculo de LOS tal y como dicta el modelo del 3GPP.

Por último, en este módulo se han añadido unas funciones auxiliares que calculan, por un lado, parámetros dependientes del escenario, como son *hE*, *distBP*, *distBP'*, *C* y *G*; así como otros parámetros como son variables aleatorias para el cálculo del *Shadow Fading* para cada tipo de celda. El parámetro *hE* es la altura efectiva del escenario, *distBP* y *distBP'* son distancias de punto de ruptura, y *C* y *G* son funciones que se utilizan para calcular probabilidades. Estos parámetros se encuentran definidos en el Anexo I

3.2.2. Módulo *nr-entities*

En este módulo se han definido los tipos que modelan las entidades de red que se van a desplegar en los escenarios. Se encuentran detallados en los siguientes apartados.

Tipo 1: *NrUser*

En adelante, este tipo será referido como *usuario*, ya que es lo que representa: un terminal de usuario móvil que se conecta a la red. Almacena cinco parámetros, que se enumeran a continuación.

- Su configuración. Está predefinida en el código, se carga al inicio del programa y no se modifica durante su ejecución. Incluye la potencia a la que transmite el usuario y la ganancia de su antena. Es una configuración sencilla, pero se puede ampliar con sólo añadir variables al código.
- Su identificador. Este valor es un número entero único para cada usuario y es asignado por el sistema durante el despliegue. Es un valor útil de cara a la distinción de usuarios, sobretodo a la hora de sacar resultados.
- Su posición. En concreto el valor que se almacena es la posición de su antena. Es entendido que al hablar de la posición de un usuario se está haciendo referencia a la posición de su antena. Este valor es una estructura que almacena las coordenadas cartesianas con ejes X, Y, Z. Las unidades de cada coordenada son metros.
- Potencias recibidas. Esta estructura contiene una lista de parejas llave-valor. La llave es un puntero a una celda y el valor es la potencia que el usuario recibe de esa celda. Durante la simulación, el usuario almacena en este mapa la potencia que recibe de todas las celdas.
- La celda a la que está conectado. En esta variable el usuario almacena un puntero a la celda a la que se conecta. Siempre se conectará a la celda de la que más potencia reciba, a no ser que esta potencia sea demasiado baja, entonces no estaría conectado a ninguna celda, almacenando el valor *NULL*.

El usuario también tiene una serie de funciones que permiten leer o escribir un valor en cada uno de los parámetros del usuario. Estas funciones de acceso a los parámetros son

necesarias porque éstos son privados en la clase y sólo pueden ser accedidos de esa manera. Esto robustece el programa ya que protege los parámetros de operaciones no permitidas.

Tipo 2: *mmwCell*

En adelante, este tipo será referido como *celda*, ya que representa una estación base que da servicio de red móvil a los usuarios. Almacena cuatro parámetros, que se enumeran a continuación.

- Su configuración. Tiene la misma estructura que la configuración del usuario, con la diferencia de que incluye también la frecuencia central de la portadora en la que transmite. Este dato se tiene en cuenta en el cálculo del *pathloss*.
- Su identificador. Equivalente al identificador del usuario.
- Su posición. Equivalente a la posición del usuario. La posición que se almacena también es la de la antena de la celda.
- El tipo de celda. Es un valor entero que indica de qué tipo es la celda, de entre los que se distinguen en el documento de modelado de pérdidas por propagación. Sus valores posibles son: 1 para *Rural Macro*, 2 para *Urban Macro*, 3 para *Urban Micro* y 4 para *Indoor Hotspot*.

Al igual que el usuario, la celda tiene funciones para leer y escribir sus parámetros.

3.2.3. Módulo *nr-actions*

Este es el módulo que más contenido tiene, ya que en él se encuentran todas las acciones que se realizan sobre la red. Al igual que los tipos, las acciones están implementadas en forma de clases C++. A continuación se presenta cada una de ellas y se explica brevemente su función.

- *InitOutFile*. Es una acción inicializadora que abre y prepara el fichero de resultados de la simulación, añadiendo la cabecera de los datos en la primera línea. Si no encuentra el fichero, lo crea, y si lo encuentra, comienza a escribir al principio del mismo, sobrescribiendo su contenido anterior. El nombre de este fichero depende del escenario que se esté ejecutando, cada escenario tiene asociado un fichero de resultados.

- *SetUserPositions* y *SetCellPositions*. Estas acciones se encargan de asignar una posición a todos los usuarios y celdas desplegados por el sistema. Estas acciones siempre son inicializadoras, pero también pueden ejecutarse durante la simulación si el escenario requiere movilidad de usuarios.
- *UserPowerMeasure*. Esta acción se encarga de calcular la potencia que recibe cada usuario de cada celda y almacenar la información en el mapa de cada usuario. Para estructurar mejor el código, se han creado dos clases que dividen los cálculos de esta acción. La primera es *PathLossCalc*, donde se encuentran las llamadas a las funciones del módulo *nr-propagation*, y la segunda es *DistParameters*, que calcula y gestiona todos los parámetros del escenario, descritos en la sección 3.2.5.
- *UserConnection*. Esta acción lee el mapa de celdas de cada usuario y hace que este se conecte a la celda de la que más potencia recibe, siempre que esté por encima de un umbral.
- *PrintUserPositions* y *PrintCellPositions*. Estas acciones almacenan en un fichero las posiciones de todos los usuarios y todas las celdas, para los casos en los que es necesario dibujar un mapa del escenario.
- *PrintUserInfo*. Esta es la acción que almacena los resultados. En cada iteración, almacena en un fichero toda la información necesaria para el posterior análisis de la simulación. Los datos que almacena son el número de iteración, el identificador del usuario, su posición, el identificador de la celda a la que está conectado, la potencia a la que transmite dicha celda, la distancia entre el usuario y la celda y por último la potencia que recibe el usuario de la celda.

3.2.4. Módulo *nr-locator*

Este módulo contiene dos clases cuyo código genera posiciones para usuarios y celdas. La primera clase, *NrLocator*, genera posiciones aleatorias dentro de un rectángulo o un anillo. Es utilizada para asignar posiciones aleatorias a los usuarios en un escenario. La segunda clase, *NrHexLocator*, genera posiciones en forma de hexágono, que son utilizadas para desplegar celdas.

En la figura 4 se muestra un diagrama con los pasos que componen la realización de una

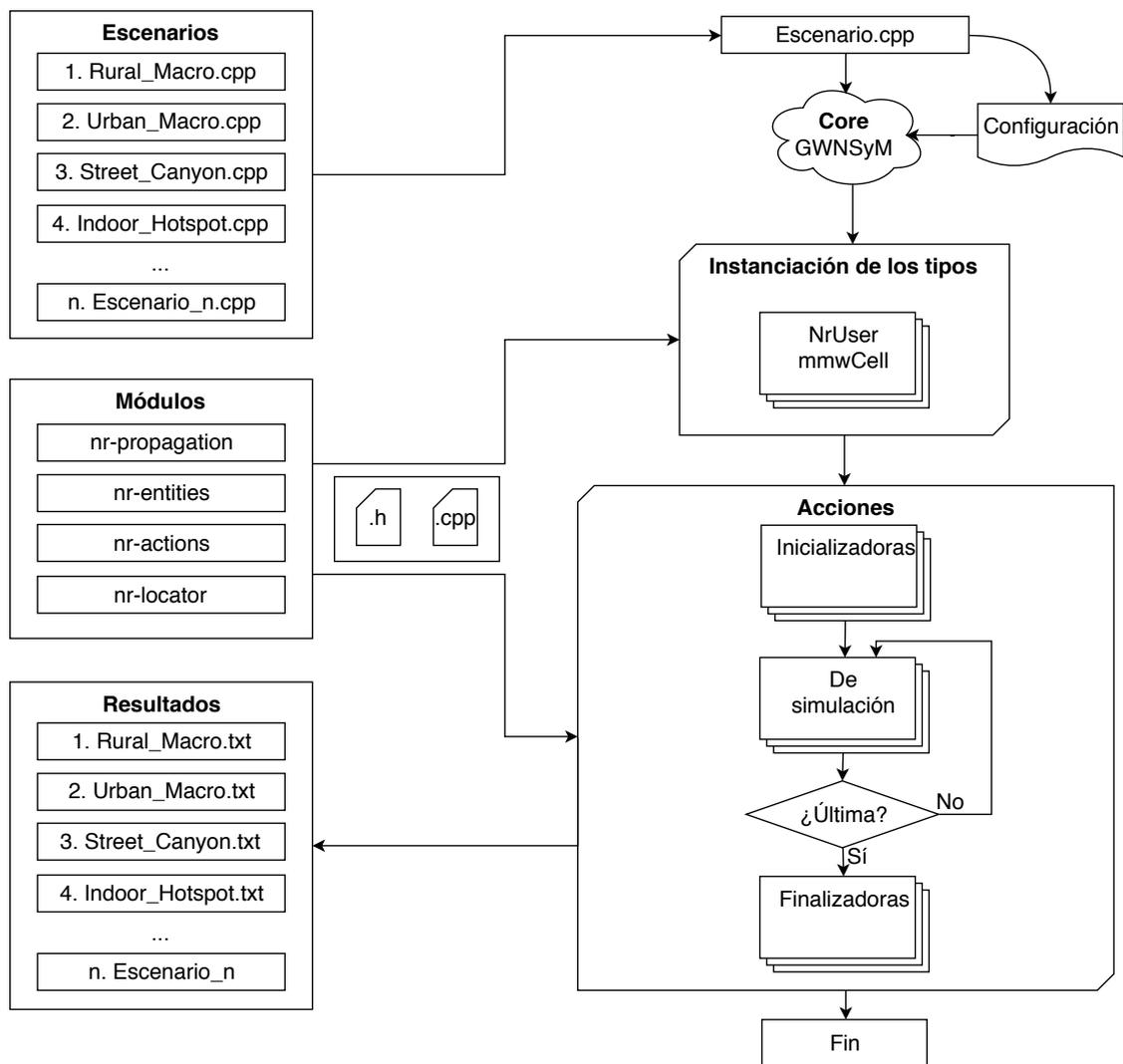


Figura 4: Diagrama del proceso de simulación en GWNSyM

simulación. A la izquierda se encuentran, separados por grupos, los distintos archivos que se ejecutan y en los que se almacenan resultados. A la derecha se encuentra el flujo que sigue el programa con referencias a los archivos que se utilizan en cada paso. El programa comienza con la ejecución del escenario. Este carga su archivo de configuración e instancia el objeto system, que es el core del simulador. A continuación se instancian los tipos necesarios para el escenario, que se encuentran definidos en el módulo *nr-entities*. Se despliega el número de elementos de cada tipo dictado por la configuración del escenario. Una vez terminado este paso, se continúa con las acciones del escenario, que se encuentran definidas en el módulo *nr-actions* y que utilizan funciones de *nr-propagation* y *nr-locator*. Como se aprecia en la

caja *Acciones*, primero se ejecutan las inicializadoras, luego las de simulación, que se repiten tantas veces como fotografías se especifican en la configuración, y por último las finalizadoras. En este proyecto, es necesario almacenar los resultados de todas las fotografías para su posterior procesamiento en Matlab, por lo que esta operación se hace añadiendo sucesivamente al archivo los resultados de cada fotografía con una acción de simulación, y no se utilizan las acciones finalizadoras.

3.2.5. Escenarios

Una vez se han visto todos los módulos que intervienen en la simulación, se van a explicar los distintos escenarios que se han preparado para ejecutar las simulaciones. Se entiende como escenario a una disposición concreta de usuarios y celdas con una configuración determinada sobre los que se ejecutarán una serie de acciones y se obtendrán resultados a partir de las mismas.

Escenario A

Este escenario contiene una única celda y un usuario. A ambos se les asigna una posición inicial antes de iniciar el ciclo de fotografías. Primero se mide la potencia que recibe el usuario de la celda, a continuación se almacena el valor y por último se aleja al usuario de la celda una distancia. Este proceso se repite tantas veces como muestras se desee obtener. Los resultados se pueden representar con una curva potencia-distancia. También se puede fijar un umbral a partir del cual se considera que el usuario no recibe potencia suficiente para conectarse a la celda, con lo que se obtiene el rango de la celda. Para obtener unos resultados más uniformes, se despliega un número de usuarios en la misma posición. Al ser sus medidas independientes, se calcula la media entre todos ellos y se trata como uno sólo. Esto se aplica también a algunos de los escenarios posteriores.

Los parámetros modificables de este escenario son los siguientes:

- Configuración del usuario y la celda
- Posición inicial de la celda
- Posición inicial del usuario

- Tipo de celda
- Número de usuarios desplegados para el cálculo de la media
- Número de fotografías de la simulación
- Salto de distancia del usuario entre fotografías

En la figura 5 se muestra un diagrama de este escenario, en el que se observa una celda de tipo macro (o macrocelda) y un UT (o usuario) que va cambiando de posición en cada fotografía.

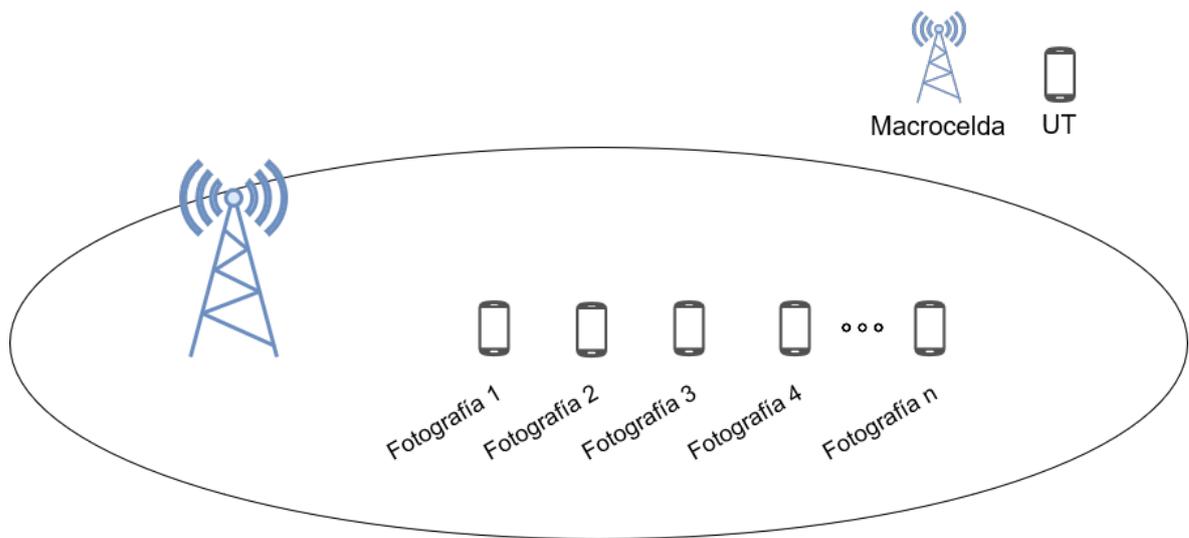


Figura 5: Diagrama del escenario A

Escenario B

Este es un escenario de tipo *Street Canyon*, en adelante cañón urbano. Consiste en una calle relativamente estrecha con una hilera de edificios altos a ambos lados, siendo su aspecto comparable al de un cañón. En este escenario se distingue la zona exterior (la calle) de la zona interior (dentro del edificio). Se despliega una celda de tipo *UMi* en la calle, siendo opcional añadir otra de tipo *Indoor* en el interior de un edificio. Los usuarios se despliegan de manera uniforme en forma de rejilla rectangular por todo el escenario, tanto en la calle como en los edificios. Las acciones consisten en que cada usuario mide la potencia que recibe de cada celda, la almacena y escoge a cuál se conecta, si es que recibe potencia suficiente. En este escenario, se realizan tantas fotografías como de muestras se quieran disponer para

calcular el valor medio de cada una.

Para el caso en el que se añade la celda *Indoor*, cabe señalar que su potencia transmitida debe ser bastante inferior a la de la celda del exterior, ya que su rango de cobertura es inferior también.

Los parámetros modificables de este escenario son los siguientes:

- Configuración del usuario y la celda
- Posición inicial de la o las celdas
- Posición de dos aristas (en diagonal) del rectángulo que contiene la rejilla de usuarios
- Tipo de cada celda
- Número de fotografías de la simulación

En la figura 6 se muestra un diagrama de este escenario. Los bloques a ambos lados del diagrama representan los edificios, y el pasillo entre ellos representa la calle. Los elementos que forman el escenario son los UT; la celda de tipo *UMi*, que está representada por el símbolo de una microcelda; y la celda de tipo *Indoor*, representada por el símbolo de una picocelda. Los elementos que tienen un nivel de transparencia inferior están dentro de los edificios.

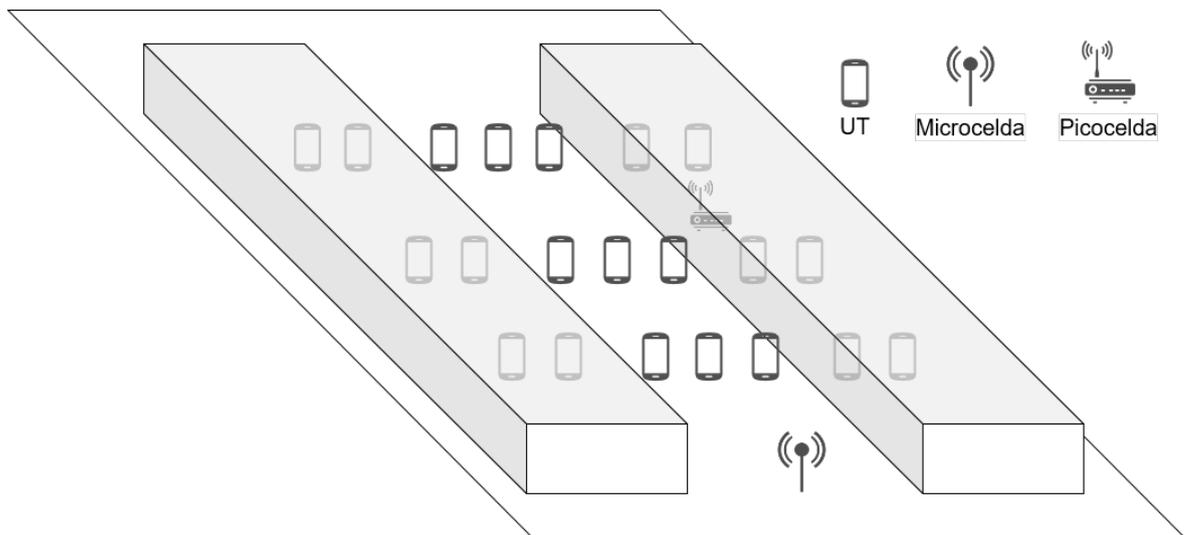


Figura 6: Diagrama del escenario B

Escenario C

Este escenario está formado por un clúster de siete celdas cuyo despliegue sigue un patrón hexagonal, que pueden ser de tipo *RMa* o *UMa*. Los usuarios se colocan de manera aleatoria dentro de una circunferencia que tiene el mismo centro que el conjunto de celdas. Este escenario dispone de varias configuraciones. En primer lugar, todas las celdas pueden ser del mismo tipo (*RMa*, *UMa* o *UMi*). En segundo lugar, la celda central puede ser de un tipo y las demás de otro tipo, transmitiendo a una potencia inferior. Un ejemplo de este segundo caso puede ser combinar una celda central *UMa* con varias celdas *UMi* alrededor. Siguiendo este ejemplo se pueden realizar múltiples combinaciones de celdas para las simulaciones.

Los parámetros modificables de este escenario son los siguientes:

- Configuración del usuario y la celda.
- Posición inicial del clúster.
- Radio de la circunferencia dentro de la cual se despliegan los usuarios aleatoriamente.
- Tipo de la celda central y de las adyacentes.
- Número de fotografías de la simulación.

En la figura 7 se muestra un diagrama de este escenario. Se ha representado la celda central del clúster como una macrocelda y las demás como microceldas. Esta es la configuración por defecto del escenario, pero no impide que se pueda modificar, como se ha mencionado en el párrafo anterior.

Escenario D

Este escenario tiene unas características similares al escenario anterior. Está compuesto por un número de celdas que se despliegan en un entorno urbano en forma de rejilla. Se coloca un sólo usuario, y en cada iteración se varía ligeramente su posición de manera aleatoria. De esta forma se consigue simular que el usuario está caminando por el escenario, y se evalúa la variación de la señal que recibe en cada momento.

Los parámetros modificables de este escenario son los siguientes:

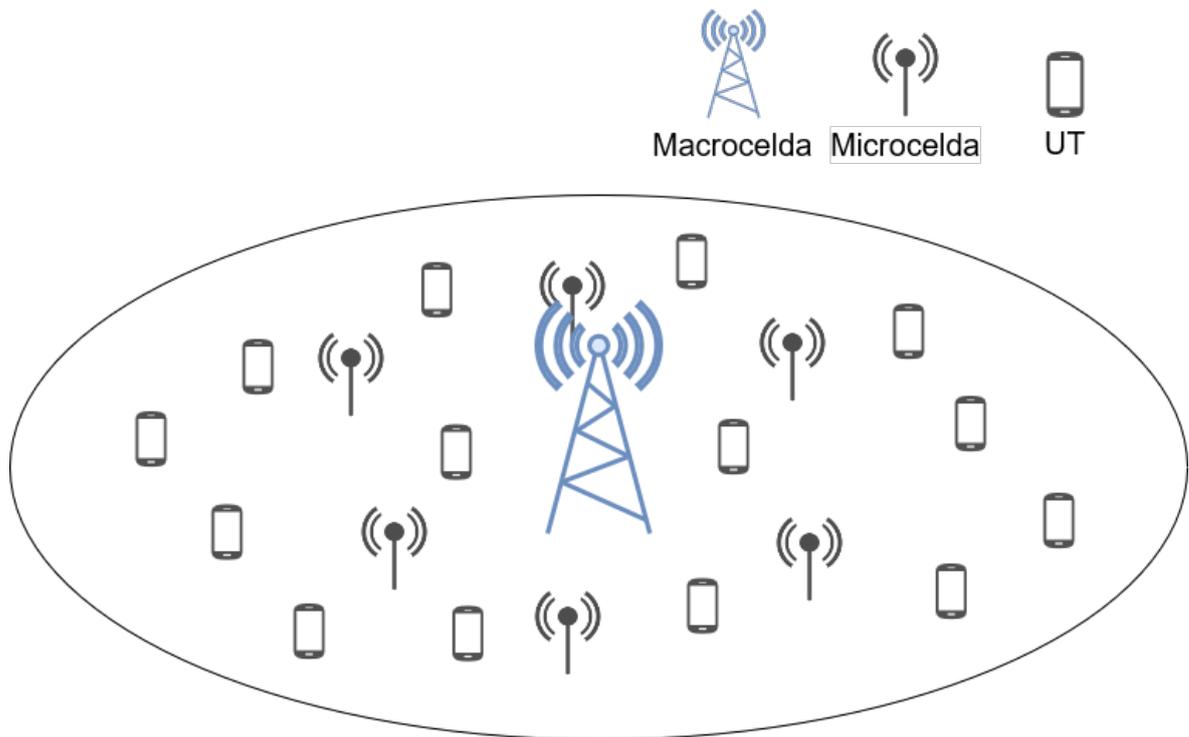


Figura 7: Diagrama del escenario C

- Configuración del usuario y las celdas.
- Posición del rectángulo que contiene la rejilla de celdas.
- Posición inicial del usuario.
- Tipo de las celdas.
- Número de fotografías de la simulación.

En la Figura 8 se muestra un diagrama de este escenario. Las flechas simbolizan el movimiento del usuario a través del escenario.

Escenario E

Este escenario está formado por una rejilla uniforme de celdas que se despliegan en un entorno urbano y un número de usuarios que se colocan de manera aleatoria entre ellas. En el inicio de la simulación, sólo unas pocas celdas están activas. Sucesivamente, se va aumentando el número de celdas activas hasta llegar al máximo. En cada momento, los usuarios miden la potencia recibida únicamente de las celdas que están activas.

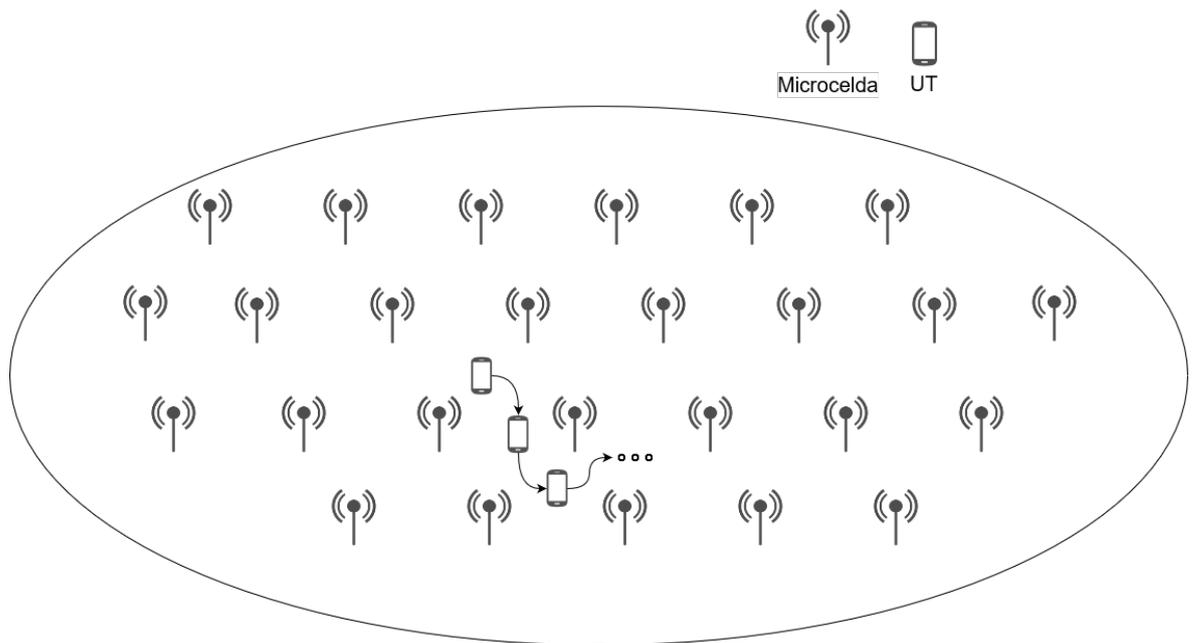


Figura 8: Diagrama del escenario D

Los parámetros modificables de este escenario son los siguientes:

- Configuración del usuario y la celda.
- Posición de dos aristas (en diagonal) del rectángulo que contiene la rejilla de celdas.
- Radio de la circunferencia dentro de la cual se despliegan los usuarios aleatoriamente.
- Tipo de las celdas.
- Número de fotografías de la simulación.

En la Figura 9 se muestra un diagrama de este escenario. Cabe señalar que en el escenario de la simulación el número de usuarios es superior al de celdas, aunque por la legibilidad del diagrama se han representado menos usuarios.

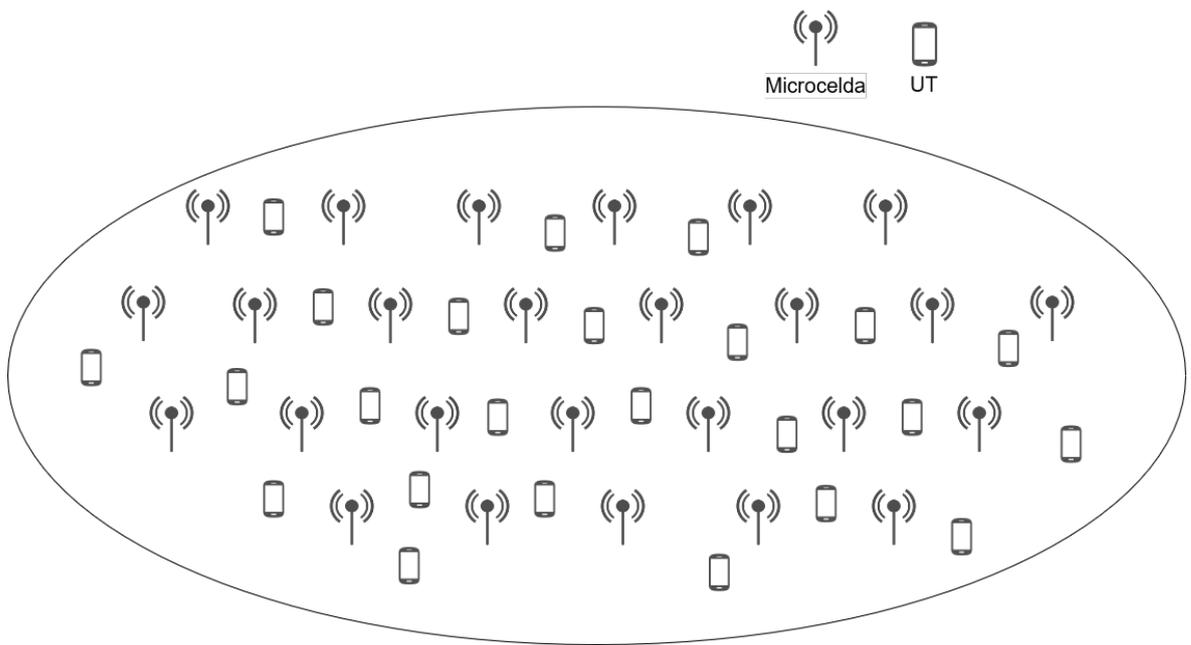


Figura 9: Diagrama del escenario E

4 Simulaciones y Resultados

En este capítulo se exponen los resultados de las simulaciones que se han realizado sobre los escenarios descritos en la sección 3.2.5. El capítulo se divide en una sección por escenario, y cada sección se divide en las distintas simulaciones que se han realizado sobre el escenario. Primero se presentan los parámetros establecidos para la simulación y después sus resultados, haciendo un posterior análisis de los mismos.

Se han establecido unos parámetros generales que se aplican en todos los escenarios para que las simulaciones se realicen en igualdad de condiciones. En los escenarios en los que es necesario llevar a cabo múltiples realizaciones para obtener un valor medio de los resultados, se realizan 1000 realizaciones. La ganancia de las antenas tanto de las celdas como de los usuarios es de 0 dB.

En las simulaciones, se dice que los usuarios se conectan a las celdas. Se considera que un usuario se conecta a una celda siempre y cuando la potencia que recibe de esa celda es superior a -100 dBm y no recibe una potencia mayor de ninguna otra. O lo que es lo mismo, se considera que el usuario se conecta a la celda de la que más potencia recibe, siempre y cuando esta es mayor que -100 dBm. En caso de que la potencia que recibe de todas las celdas sea inferior a este valor, se considera que el usuario no puede conectarse a ninguna celda. En la simulación, el usuario no interactúa con la celda, pero si recibe más potencia de -100 dBm se considera que puede intercambiar datos con la celda sin problemas. El valor de -100 dBm se ha escogido con el único objetivo de comparar los diferentes escenarios y tipos de estaciones base.

4.1. Simulaciones en el escenario A

En el escenario A se han realizado tres simulaciones distintas, con los tipos de celda *RMa*, *UMa*, e *InH*. Este escenario se ha utilizado para validar los modelos de propagación en el sistema. Los parámetros de la simulación se encuentran en la Tabla 4. En esta tabla se indican tanto los parámetros referentes a la celda, como aquellos utilizados para configurar el escenario y el usuario. En la columna "Valor" se aprecia que hay filas que contienen tres

Tabla 4: Parámetros de la simulación en el escenario A

	Parámetro	Valor	Unidades
Celda	Potencia transmitida	0	dBm
	Frecuencia de portadora	20, 20, 20	GHz
	Tipo de celda	RMa, UMa, InH	-
	Posición de la celda (eje X)	0	metros
	Altura de la antena de la celda	35, 10, 2	metros
Escenario	Posición inicial del usuario (eje X)	35, 35, 1	metros
	Altura de la antena del usuario	1.5	metros
	Mediciones en cada fotografía	1000	-
	Número de fotografías de la simulación	1000, 1000, 100	-
	Desplazamiento del usuario	1	metros

valores separados por comas. En este caso, cada valor hace referencia a cada una de las tres simulaciones que se han realizado sobre el escenario, respectivamente.

4.1.1. Simulación 1. Macrocelda en entorno rural

En la simulación número 1 el usuario se coloca inicialmente a 35 metros horizontales de la celda y en cada iteración se aleja un metro de la misma. Se realizan 1000 iteraciones para así obtener el rango de potencia de la celda a lo largo de un kilómetro. La celda transmite a 0 dBm de potencia. Se ha escogido este valor para poder representar las pérdidas de propagación de manera visual. De esta manera, si el usuario mide una potencia de -80 dBm, directamente se sabe que las pérdidas que ha sufrido la señal son de 80 dB.

En la Figura 10 se han representado los resultados obtenidos de la primera simulación cuando se usa una celda de tipo *RMa*. El eje Y de la gráfica representa la potencia medida por los usuarios en cada posición. El eje X de la gráfica representa la distancia a la que se encuentra el usuario de la antena de la celda. Se realizan mediciones cada metro un total de 1000 veces, siendo la última medición a 1035 metros. La gráfica contiene cuatro curvas. La curva que está dibujada en color azul representa el valor medio de los resultados obtenidos. Para cada distancia en el eje X se han obtenido 1000 valores con los cuales se calcula el valor medio

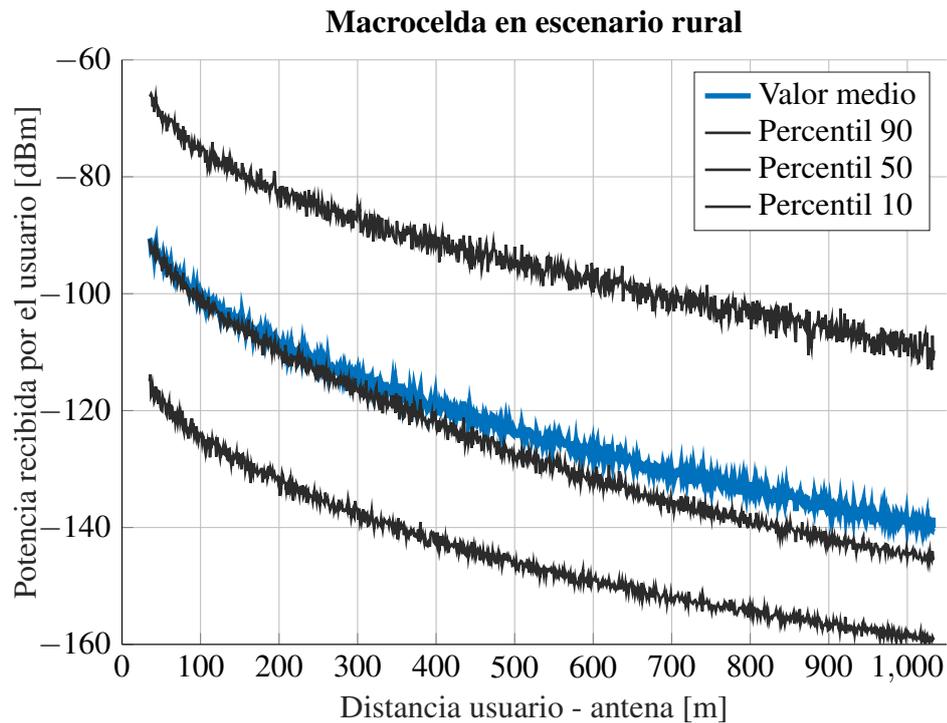


Figura 10: Resultados de la simulación en el escenario A con la celda *RMa*

del eje Y. Las otras tres curvas representan los percentiles 90, 50 y 10, respectivamente, del conjunto de datos. Se observa que el percentil 50 es casi igual al valor medio para distancias menores a 300 metros. A partir de 300 metros estas dos curvas se separan ligeramente, hasta un máximo de 5 dB a la distancia de 1035 metros. Aún con esta variación, se puede afirmar que la distribución de las medidas es uniforme con respecto al valor medio. Durante los primeros 400 metros el nivel de potencia decrece de manera exponencial. Después se suaviza a un decrecimiento lineal.

Es notable la gran pérdida de potencia de la señal desde el primer instante de medida. Estando el usuario a 35 metros (horizontales) de la celda las pérdidas son de 90 dB. En la última medida ascienden a 140 dB. Teniendo en cuenta los percentiles, el rango de pérdidas está entre 65 y 115 dBm para el punto más cercano y entre 110 y 160 para el más lejano. Entre los percentiles 90 y 10 hay una diferencia casi constante de 50 dB. Esto indica que para la misma distancia la potencia que recibe el usuario puede cambiar drásticamente debido a los desvanecimientos que se producen.

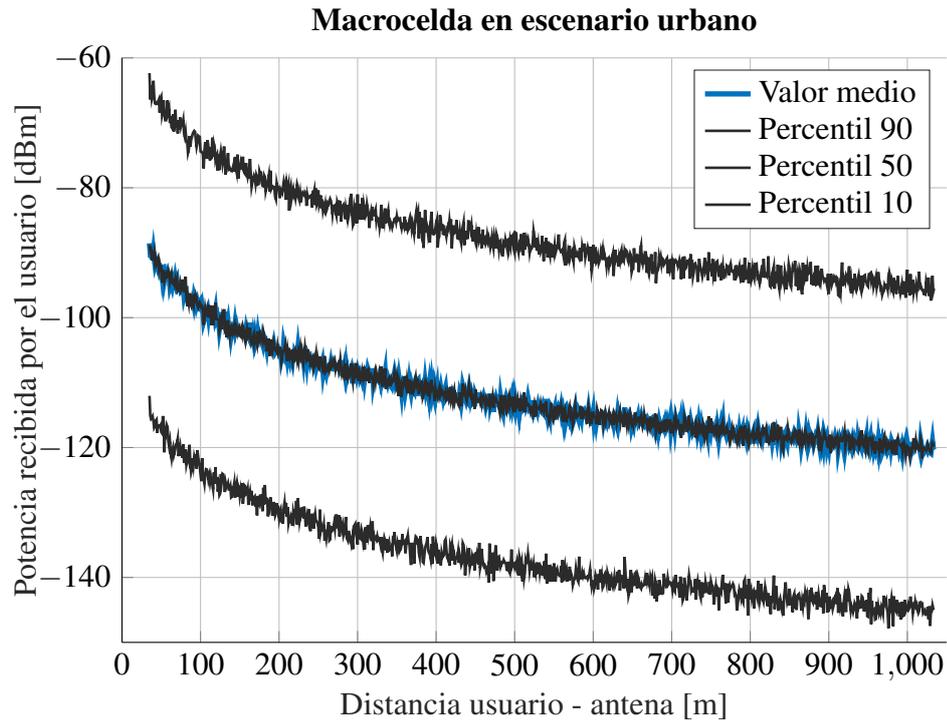


Figura 11: Resultados de la simulación en el escenario A con la celda *UMa*

4.1.2. Simulación 2. Macrocelda en entorno urbano

La simulación número 2 se ha realizado de la misma manera y con las mismas características que la anterior, la única diferencia es que el tipo de celda es Macrocelda Urbana.

En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos de la simulación. En este caso se observa que el valor medio de las medidas coincide exactamente con el percentil 50 de las mismas. En la distancia más corta, las pérdidas son de 90 dB, al igual que se observaba en la simulación anterior. Mientras que en la distancia más larga son de 120 dB, 20 dB menos de pérdidas que en la simulación 1. Esto se debe a que en el entorno urbano se producen más reflexiones que ayudan a que la señal llegue al usuario. En cuanto a los percentiles 90 y 10, para la primera medida son 62 y 112 dB, mientras que para la última son de 92 y 142 dB. La diferencia entre percentiles es, nuevamente, prácticamente constante en torno a 50 dB. Estos resultados son similares a los de la simulación 1 exceptuando que en esta simulación las pérdidas crecen menos con la distancia. La diferencia va aumentando gradualmente hasta llegar a 20 dB a la distancia máxima, como se ha mencionado ya. Otra diferencia con la

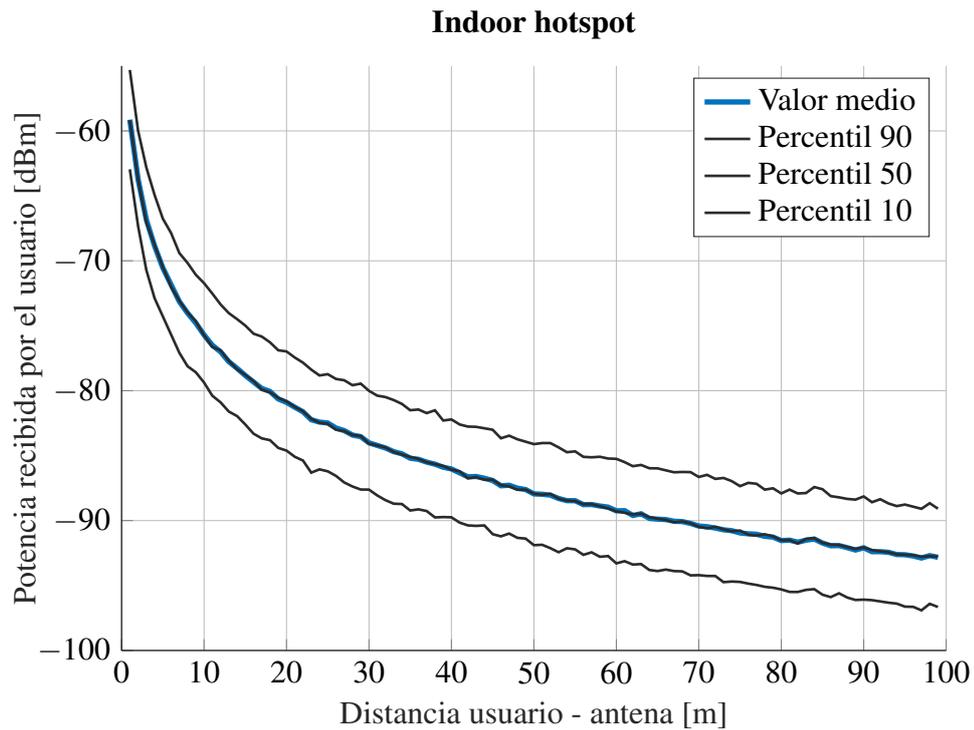


Figura 12: Resultados de la simulación en el escenario A con la celda *InH*

simulación anterior es que en esta el valor medio coincide exactamente con el percentil 50 de las medidas.

4.1.3. Simulación 3. Picocelda en entorno de interior

En la simulación número 3, a diferencia de las anteriores, el usuario se coloca inicialmente a un metro de la celda y en cada iteración se aleja un metro de la misma. Se realizan 100 iteraciones para así obtener el rango de potencia de la celda a lo largo de 100 metros, ya que el modelo de propagación no contempla distancias mayores para este tipo de celda.

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos. Las pérdidas son menores que en las dos simulaciones anteriores, también lo son las distancias. Las pérdidas que sufre la señal a un metro de distancia son de 59 dB. Conforme aumenta la distancia aumentan las pérdidas de manera exponencial negativa, hasta llegar a 93 dB a la distancia de 100 metros. El percentil 50 coincide exactamente con el valor medio de las medidas. Los percentiles 90 y 10 marcan unas pérdidas de 55 y 63 dB en la primera medida y de 89 y 97 dB en la última.

A la vista de los resultados de las tres simulaciones se validan los tres modelos de propagación, ya que los resultados que se han obtenido a partir de los mismos son coherentes.

4.2. Simulaciones en el escenario B

Este escenario se ha realizado por un lado para validar el modelo de propagación de la celda Urban Micro (Street Canyon) y por otro para analizar sus particularidades. El documento de la ETSI incluye un modelo de pérdidas por penetración en un edificio, que se ha incluido en la programación de este escenario.

En este escenario se han realizado dos simulaciones. La primera se ha realizado con una única celda situada en la calle, como se define en la sección 3.2.5. La segunda se ha realizado añadiendo la segunda celda en el interior del edificio.

Los parámetros de las simulaciones se muestran en la Tabla 5. En esta tabla se incluyen, separados por una coma, los parámetros de la celda interior *InH* que se añade en la simulación número 2. Cabe destacar que, tal como se indica en la Tabla 5, la frecuencia de la celda de interiores es muy superior a la que se encuentra en el exterior del edificio. La potencia transmitida es de 36.99 dBm para la celda exterior y de 23.98 dBm para la interior. Estos valores se corresponden con 5 y 0.25 W. Concretamente, las celdas se han posicionado tal como se indica en la Figura 13. En ambas simulaciones se realiza un total de 1000 fotografías. En cada fotografía cada usuario realiza una medición, por lo que al final de la simulación cada usuario ha realizado 1000 mediciones con las que se calcula el valor medio.

En la Figura 13 se muestra un mapa con la disposición de los elementos del escenario. Los usuarios están representados con un círculo azul, las celdas con un asterisco rojo y magenta, y la separación entre la calle y el edificio por una línea negra. Para ambas simulaciones se han desplegado 300 usuarios formando una rejilla de 15x20. El tamaño de la rejilla es de 20 metros de ancho por 50 de largo, mientras que el exterior de la calle mide 10 metros de ancho por 60 de largo. La rejilla de usuarios está colocada centrada en el eje vertical de la calle y

Tabla 5: Parámetros de la simulación en el escenario B

	Parámetro	Valor	Unidades
Celda	Potencia transmitida	36.99, 23.98	dBm
	Frecuencia de portadora	25, 66	GHz
	Tipo de celda	UMi, InH	-
	Posición de la celda	(15,0), (25,25)	metros
	Altura de la antena de la celda	10, 2	metros
Escenario	Posición de los usuarios	Rejilla	-
	Altura de la antena de los usuarios	1.5	metros
	Mediciones en cada fotografía por usuario	1	-
	Número de fotografías de la simulación	1000	-

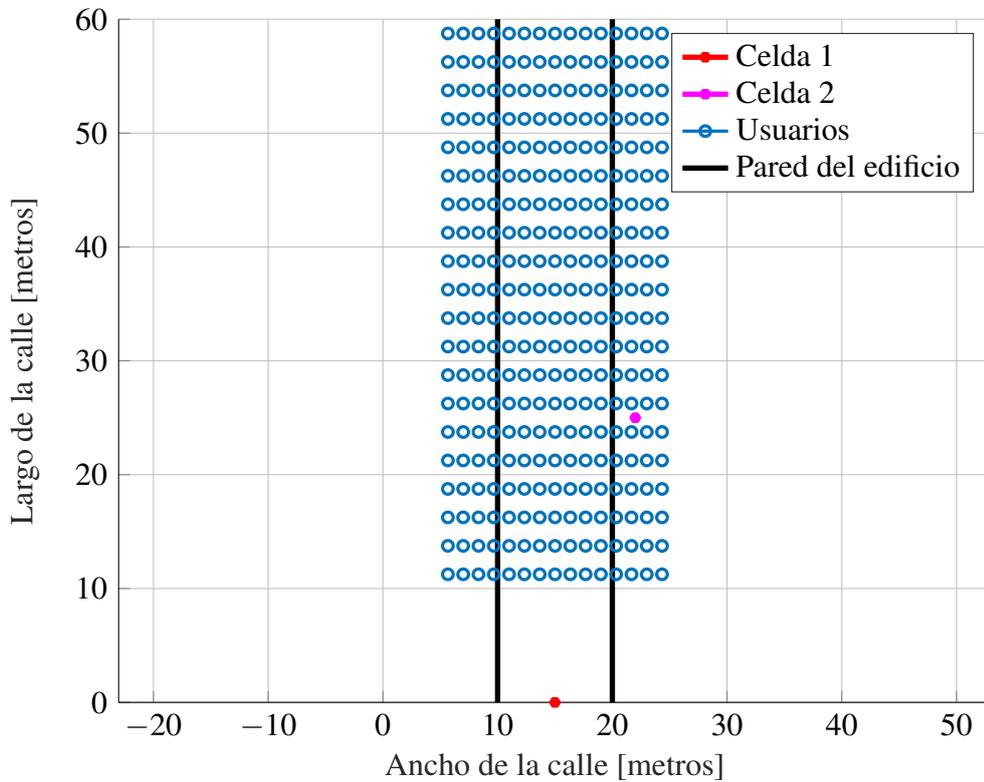


Figura 13: Diagrama del alzado del escenario B

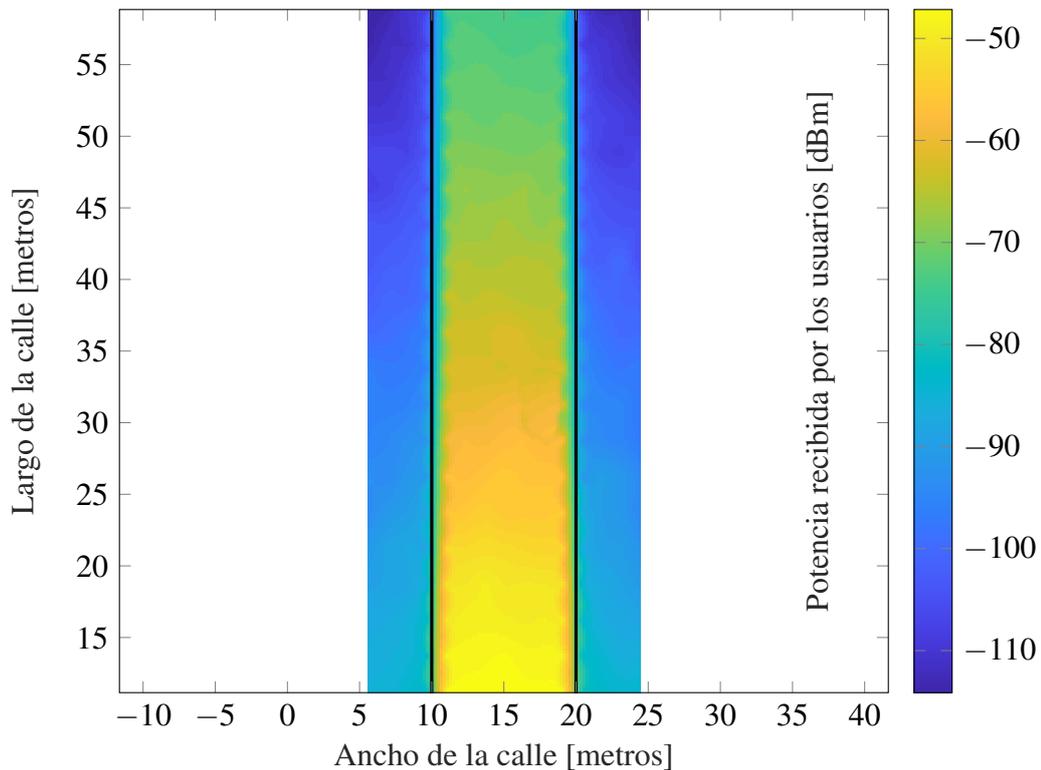


Figura 14: Resultados de la simulación 2 en el escenario B

desplazada hacia el final de la misma, dejando 10 metros libres desde el inicio, posición sobre la cual está colocada la celda, también sobre el eje vertical. Esto se debe a que en el modelo de propagación se define que la distancia mínima horizontal entre una celda UMi y un usuario son 10 metros. Los usuarios de la rejilla que sobresalen del exterior de la calle se encuentran en el interior de los edificios. La franja central, situada entre las dos líneas negras forma la calle, mientras que las áreas que se encuentran a la izquierda y derecha de estas dos líneas forman el interior de los edificios.

4.2.1. Simulación 1. Una sola celda

En esta simulación se ha desplegado una sola celda de tipo UMi en el centro de la calle. En la Figura 13, esta celda es la correspondiente a las coordenadas (15, 0).

En la Figura 14 se han representado los resultados de la simulación en forma de mapa de calor. El eje X representa el ancho de la calle y el eje Y el largo. A la derecha se muestra

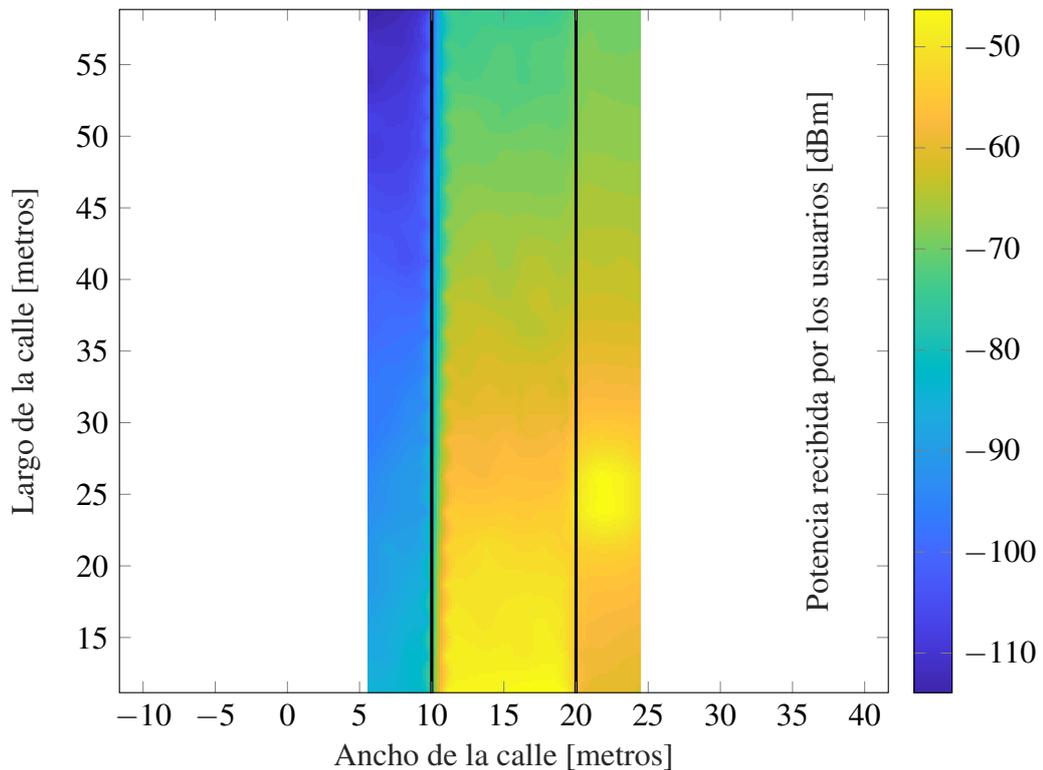


Figura 15: Resultados de la simulación en el escenario B con las celdas *UMi* e *InH*

una leyenda con la asignación de potencias a colores. La máxima potencia representada es de -44 dBm mientras que la mínima es de -105 dBm. Se observa una caída gradual de la potencia según se avanza desde el inicio hasta el fondo de la calle, desde -47 hasta -75 dBm. También se observa una caída drástica de la potencia cuando la señal penetra en los edificios, desde -47 a -82 dBm al inicio de la calle, y desde -75 a -109 dBm al final. La pérdida que se produce al penetrar la señal en el edificio es de 34 dB aproximadamente.

4.2.2. Simulación 2. Dos celdas

Esta simulación tiene las mismas características que la anterior, con la diferencia de que se ha añadido una celda de tipo *InH* en el interior del edificio de la parte derecha de la calle.

En la Figura 15 se han representado los resultados de la simulación en forma de mapa de calor, de la misma manera que en la simulación anterior. Se aprecia cómo mejora notablemente la potencia que reciben los usuarios en el interior del edificio de la derecha, donde

se encuentra la celda que se ha añadido. Aunque esta celda transmite a 13 dB menos que la del exterior, la señal que transmite no se ve afectada por las pérdidas de penetración en el edificio, por lo que su señal en el interior es mayor que la que penetra de la celda exterior. Para los usuarios de la calle y del edificio izquierdo, nada cambia con respecto a la anterior simulación, ya que ninguno de ellos recibe señal de la picocelda. Ni siquiera los usuarios de la calle que están pegados a la pared derecha lo hacen, porque al ser una señal transmitida a más frecuencia y a menos potencia, la pérdida por la pared del edificio la anula. Los usuarios del edificio derecho reciben -47 dBm en el punto máximo y -70 dBm en el mínimo. Es una gran mejora de potencia comparando con el edificio izquierdo, cuyos usuarios reciben -82 dBm en el punto máximo y -112 dBm en el mínimo.

Los resultados de ambas simulaciones son coherentes, ya que la potencia va disminuyendo según avanza por la calle de manera uniforme. También lo hace en el interior del edificio, y se distingue el escalón de bajada de potencia cuando la señal penetra en él. Por estos motivos se valida el modelo de propagación para este tipo de celda.

4.3. Simulaciones en el escenario C

El escenario C es un escenario urbano compuesto por 7 celdas distribuidas siguiendo un patrón hexagonal y 1000 usuarios distribuidos de forma aleatoria en un radio de 1500 metros. La distancia entre las celdas adyacentes que forman el clúster es de 1000 metros. Con este escenario se pretende analizar el comportamiento de una selección de acceso basada en potencia y medir la calidad de servicio que perciben los usuarios con diferentes configuraciones. A continuación se muestran los resultados obtenidos tanto con una red homogénea como heterogénea.

4.3.1. Configuración 1. 7 celdas *UMa*

En la Figura 16 se muestra un diagrama con la posición de los elementos en el escenario. Los puntos negros representan las celdas. Hay una celda central y 6 celdas a su alrededor formando un hexágono. Cada celda está identificada con un número, siendo la celda central la número 7. Cada usuario está representado con un círculo, que puede ser de distintos colores. El color depende de la celda de la que más potencia ha recibido cada uno durante las 1000

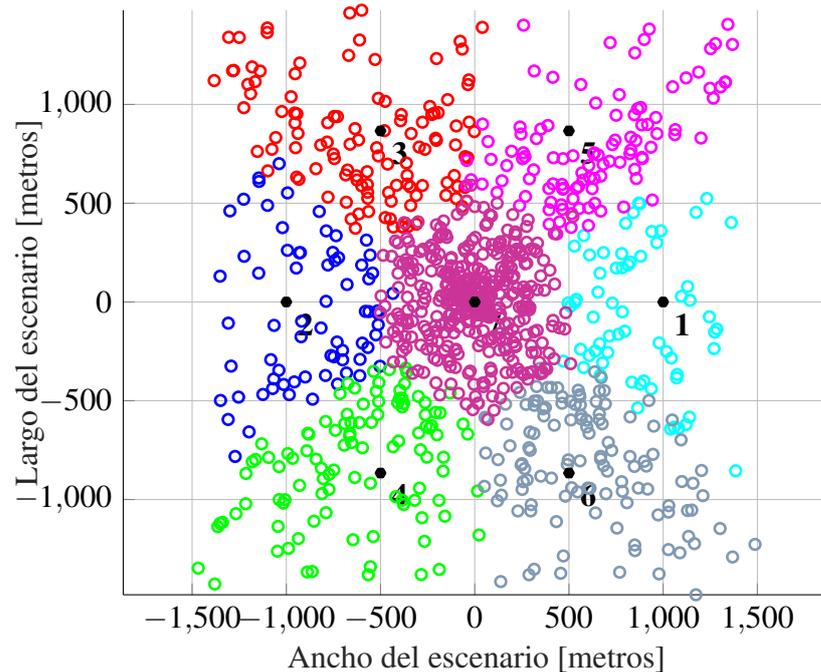
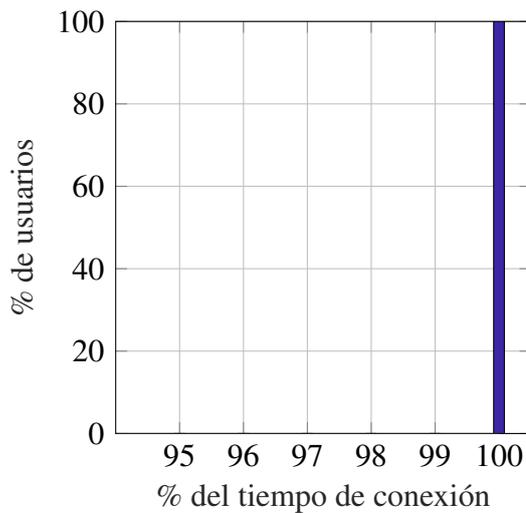


Figura 16: Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario C con la configuración 1

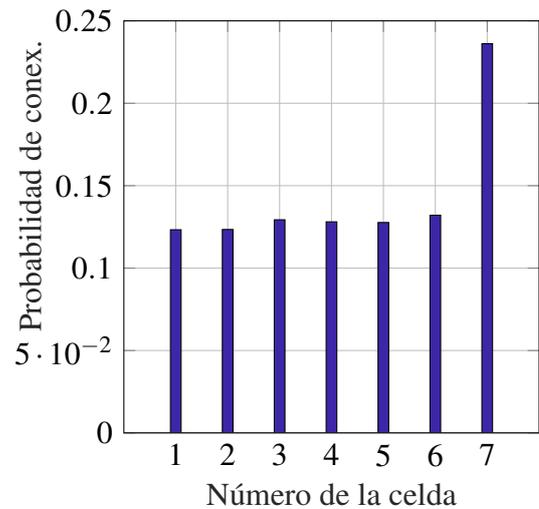
medidas que realiza en la simulación. Esta representación por colores no es del todo justa, ya que es posible que un usuario se conecte a varias celdas un número similar de veces, y en el color sólo se le represente con una de ellas. Aun así, se ha escogido esta representación para añadir información al diagrama, permitiendo distinguir a simple vista el rango de cada celda con los grupos de usuarios de distintos colores. En media, cada grupo de usuarios de un color recibe más potencia de la celda que se encuentra en el centro de ese grupo.

En esta primera simulación, las 7 celdas son de tipo *UMa* y transmiten todas a una potencia de 46 dBm, y a una frecuencia de 6 GHz. El área que cubre cada celda es muy similar, lo que tiene sentido ya que las celdas están en igualdad de condiciones. Se ha aplicado esta configuración para verificar que el escenario se comporta de la manera esperada, y así poder comparar con las simulaciones sucesivas.

En la Figura 17a se muestra un gráfico de barras en el que se representa el porcentaje del tiempo que los usuarios están conectados a una celda (reciben potencia suficiente). En este caso, el 100% de los usuarios están conectados el 100% del tiempo. Esto tiene sentido ya



(a) Porcentaje del tiempo que los usuarios están conectados a una celda



(b) Probabilidad que tiene un usuario de conectarse a cada una de las celdas

Figura 17: Gráfico de barras de la probabilidad que tiene un usuario de conectarse a cada una de las celdas y del porcentaje del tiempo que los usuarios están conectados a una celda en la simulación 2 del escenario C

que las celdas transmiten a mucha potencia, cubriendo todo el área de los usuarios.

En la Figura 17b se muestra un diagrama de barras en el que se representa la probabilidad que tiene un usuario de conectarse a cada una de las 7 celdas. Los valores se han calculado contando el número de veces que un usuario se ha conectado a cada celda y normalizando por 1. Cada usuario hace 1000 mediciones, y en cada una de ellas se conecta a la celda de la que más potencia recibe. Habiendo 1000 usuarios, dicha probabilidad se calcula a partir de 1 millón de mediciones. La celda número 7, situada en el centro del hexágono, es a la que los usuarios más se conectan. Esto se debe a que se produce una concentración de usuarios mayor en el centro del escenario que en los bordes. Al haber más usuarios alrededor de la celda 7, más usuarios se conectan a esta. La probabilidad de conectarse a esta celda es de 0.24 aproximadamente, mientras que la probabilidad de conectarse a cualquiera de las demás es de en torno a 0.13. La probabilidad de las celdas de la 1 a la 6 es similar, como mucho difiere en 0.02 puntos. Este resultado es esperado, ya que transmiten a la misma potencia y poseen la misma cantidad de usuarios a su alrededor, aproximadamente.

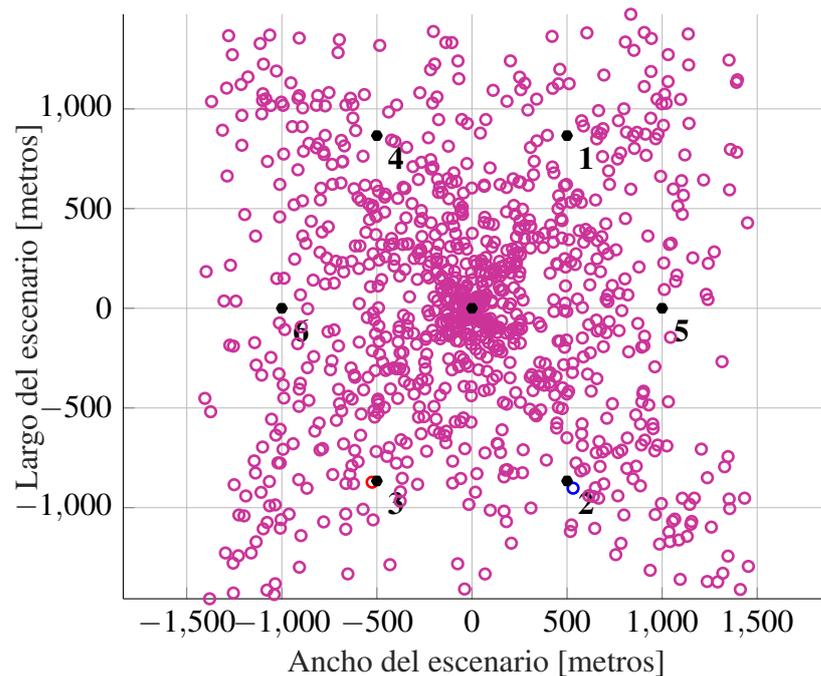


Figura 18: Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario C con la configuración 2

4.3.2. Configuración 2. 1 celda *UMa* y 6 *UMi*

En este escenario se ha implementado una segunda configuración de celdas. Se ha mantenido la celda *UMa* central sin modificación, transmitiendo a 46 dBm a la frecuencia de 6 GHz. Las demás celdas se han sustituido por celdas de tipo *UMi*. Estas celdas transmiten a una frecuencia de 25 GHz, y su altura es de 10 metros. Se han realizado tres simulaciones con distintas potencias para estas celdas, siendo estas de 40, 43.01 y 45.44 dBm que se corresponden con 10, 20 y 35 W. Para representar los resultados de estas simulaciones se disponen figuras con las tres gráficas conjuntas. Estas gráficas se identifican con la letra (a) para 40 dBm, (b) para 43.01 dBm y (c) para 45.44 dBm. En la Figura 18 se muestra el mismo diagrama que en el apartado anterior pero para la simulación del caso (c). La diferencia entre ambos gráficos es la distribución de los colores de los usuarios. En este caso casi todos los usuarios tienen el color morado. Este suceso se explica más adelante, junto con la Figura 20.

En la Figura 19 se muestran tres histogramas que representan el porcentaje de tiempo de conexión de los usuarios. Para cada porcentaje de tiempo en el eje X, se muestra un porcen-

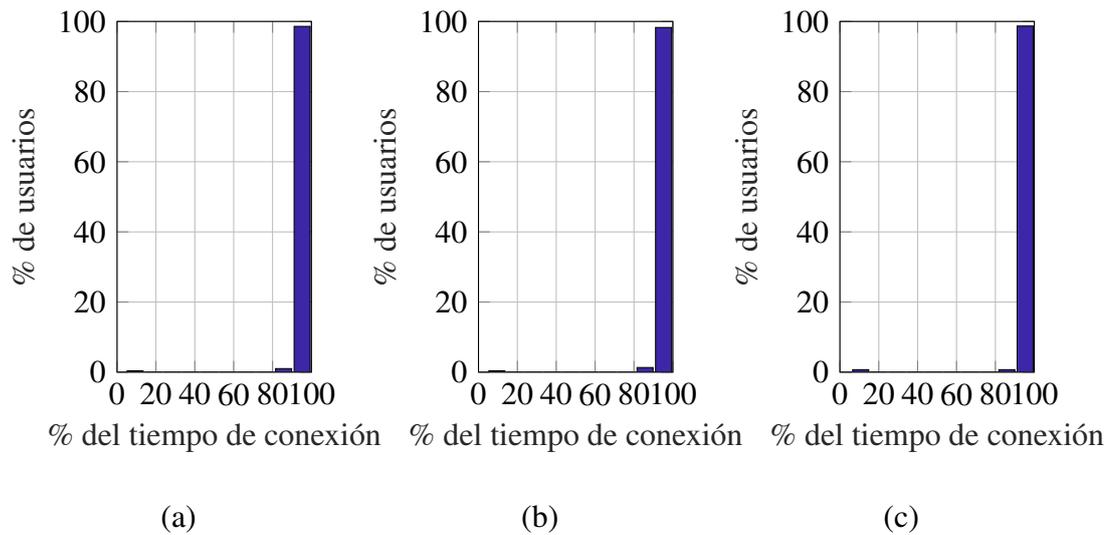


Figura 19: Histograma que representa el porcentaje del tiempo que los usuarios están conectados a una celda en el escenario C con la configuración 2, para cada una de las tres simulaciones (a), (b) y (c)

taje de usuarios en el eje Y. Cada histograma se corresponde con una simulación, como se menciona en el párrafo anterior. Se observa que los resultados son similares. La gran mayoría de usuarios en los tres casos está conectado el 100% del tiempo. Hay una pequeña parte de los usuarios que tienen conexión el 85% del tiempo, y para el caso (c) hay otra pequeña parte que sólo se conecta el 10% del tiempo.

En la Figura 20 se muestran tres gráficos de barras en los que se representa la probabilidad que un usuario tiene de conectarse a cada una de las celdas, si es que recibe potencia suficiente. Así como en la primera simulación la celda central tenía una probabilidad de 0.25, en este caso es de 0.962, 0.957 y 0.947 para los casos (a), (b) y (c), respectivamente. El resto de la probabilidad se reparte de manera equitativa desde la celda 1 a la 6 en los tres casos. Se aprecia que al aumentar la potencia de las celdas micro, disminuye en pequeña medida la probabilidad de conectarse a la celda macro. Cuando la potencia de la micro se acerca a la de la macro, como ocurre en el caso (c), la diferencia de probabilidades sigue siendo muy grande. Esto se debe a que el modelo de propagación de la celda micro tiene más pérdidas, que no se compensan ni igualando las potencias. Además las celdas micro transmiten con mayor frecuencia, lo que hace que su señal se atenúe en mayor medida que la de la celda

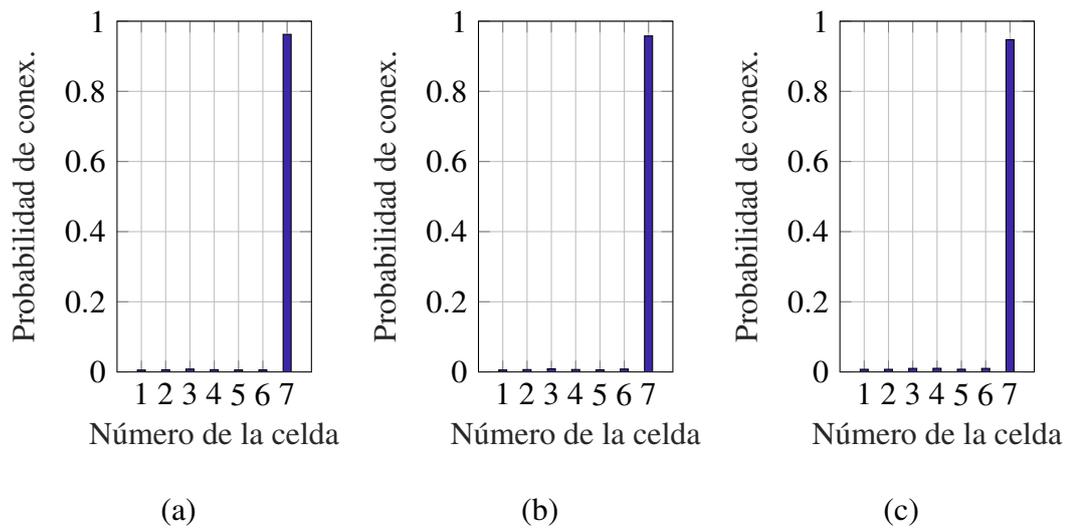


Figura 20: Histograma que representa la probabilidad de que un usuario se conecte a cada celda en el escenario C con la configuración 2, para cada una de las tres simulaciones (a), (b) y (c)

macro.

Estos resultados señalan que con esta configuración de celdas (una macro y las demás micro), la celda macro absorbe toda la carga, y las celdas micro se quedan apenas sin usuarios. Una selección de acceso basada únicamente en potencia no es eficiente en entornos de red heterogéneos como este. Es necesario tener en cuenta factores como el tipo de celda, la frecuencia de transmisión y la carga de la celda, entre otros tales como el estado del usuario, la cantidad de datos que demanda o si se está moviendo.

Por último, para comprobar si la distinta banda de frecuencia ha influido notablemente en la diferencia de potencia que reciben los usuarios entre la celda central y las demás, se han realizado las mismas tres simulaciones con la frecuencia de 6 GHz, de forma que las celdas *UMi* transmiten a la misma frecuencia que la celda *UMa*. Los resultados se muestran en la Figura 21. Se observa que la probabilidad de conectarse a la celda central es ligeramente más baja, pero sigue siendo muy grande en comparación con las demás. Estos resultados, a la misma frecuencia, confirman que el modelo de propagación de las celdas *UMi* tiene muchas más pérdidas que el *UMa*. Nuevamente, los resultados obtenidos respaldan la necesidad de procedimientos de selección de acceso más avanzados.

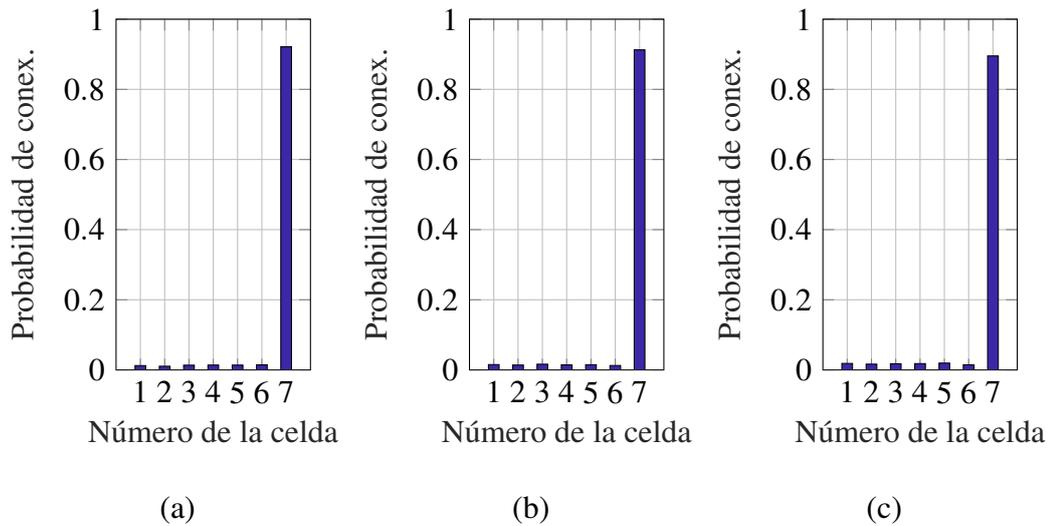


Figura 21: Histograma que representa la probabilidad de que un usuario se conecte a cada celda en el escenario C con la configuración 3, para cada una de las tres simulaciones (a), (b) y (c)

4.4. Simulaciones en el escenario D

En este escenario se ha simulado que un usuario está caminando en un entorno urbano y cada segundo mide la potencia máxima que recibe de las celdas. El escenario está formado por una rejilla de 100 celdas de tipo *UMi* separadas 100 metros entre ellas. Después de cada fotografía, el usuario se desplaza un valor aleatorio entre 1 y 3 metros en una dirección también aleatoria. Se considera que entre fotografía y fotografía pasa un tiempo de un segundo, de esta manera se simula un movimiento de entre 1 y 3 m/s, la velocidad de una persona caminando. Este proceso es conocido como *Random Walk*. Se hace esta consideración de tiempo entre fotografías para evaluar el escenario desde un punto de vista del Grado de Servicio que percibe el usuario, no para hacer una estimación del canal. Las medidas que realiza el usuario son independientes entre sí. Esto causa que los resultados puedan ser más aleatorios de lo que lo serían mediciones reales. Teniendo esto en cuenta, los resultados que se obtienen dan información acerca de los componentes aleatorios que se recogen en el modelo de propagación.

En la Tabla 6 se encuentran los parámetros de la simulación. La potencia transmitida por las celdas es de 40 dBm, y la frecuencia de 25 GHz. La altura de las celdas es de 10 metros,

Tabla 6: Parámetros de la simulación en el escenario D

	Parámetro	Valor	Unidades
Celda	Potencia transmitida	40	dBm
	Frecuencia de portadora	25	GHz
	Tipos de celda	UMi	-
	Número de celdas	100	-
	Posición de las celdas	Rejilla	-
	Altura de la antena de las celdas	10	metros
Escenario	Posición inicial del usuario	(500,500)	metros
	Altura de la antena de los usuarios	1.5	metros
	Mediciones en cada fotografía	1	-
	Número de fotografías de la simulación	20000	-

y la del usuario, que sólo hay uno, de 1.5 metros. En cada fotografía, el usuario mide la potencia que recibe de las celdas una vez, y se queda con la mayor de ellas. Se realizan 20000 fotografías, con lo que se consigue que el usuario esté caminando durante 5.55 horas.

En la Figura 22 se muestra a la izquierda un diagrama con la posición de las celdas y el recorrido del usuario, en la que se aprecia la forma aleatoria que toma la línea naranja. A la derecha se muestra un trozo de ese recorrido, entre los instantes de tiempo 10000 y 10100 segundos. Se ha realizado este recorte en el tiempo para, a continuación, poder visualizar la gráfica de la potencia recibida con mayor detalle.

En la Figura 23 se muestran dos gráficas potencia-tiempo con los resultados obtenidos de la simulación. En la gráfica de la izquierda se muestran las 20000 medidas que ha tomado el usuario durante la simulación. Las medidas toman valores entre 20 y -86 dBm. Al haber tantas medidas el gráfico puede malinterpretarse, por lo que en la derecha se ha realizado una ampliación de esta medida correspondiente con el recorrido mostrado en la gráfica 23.b. Se observa una brusca oscilación en la potencia recibida entre instantes de tiempo adyacentes. La mayoría de las veces, el valor de la potencia cambia entre 55 y 15 dB. Se debe tener en cuenta que el usuario está rodeado de muchas celdas sin interferencia. El usuario calcula su medida como el máximo de las medidas que recibe de las celdas a su alrededor, por lo que

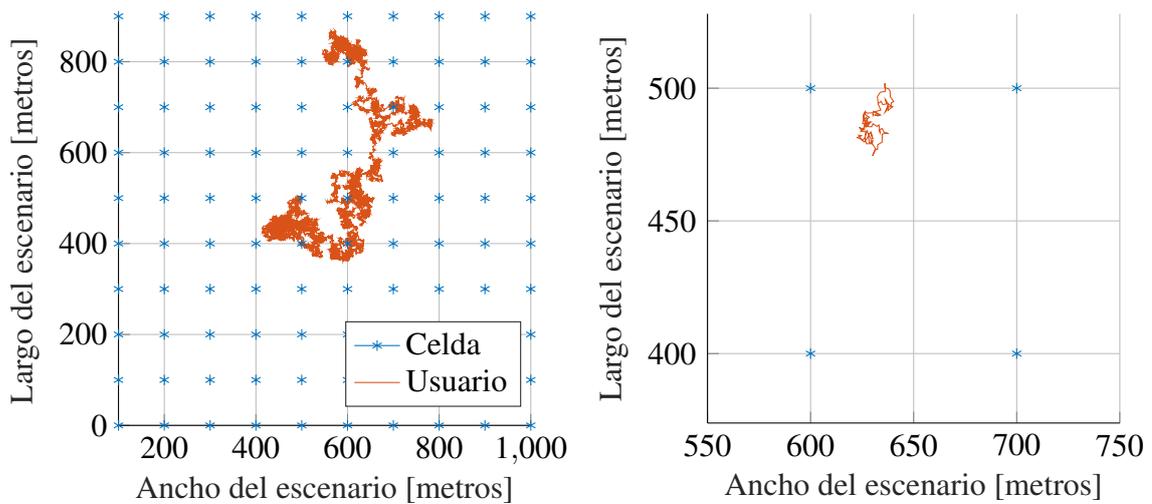


Figura 22: Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario D

cuando la potencia cae de un instante al siguiente, lo hace en todo el entorno cercano del usuario.

Estos resultados indican que en esta banda de frecuencia millimeter-wave se producen importantes desvanecimientos de la potencia de señal que pueden afectar al Grado de Servicio que percibe el usuario. El impacto de estos desvanecimientos se puede minimizar utilizando nuevas tecnologías como la conexión simultánea con múltiples celdas y beamforming.

4.5. Simulaciones en el escenario E

Este escenario se va a utilizar para evaluar el rendimiento de una red densificada. El área del escenario es un cuadrado de 2 kilómetros de lado en el que se despliegan 1000 usuarios y distintos números de celdas, ambos de manera aleatoria. El entorno es urbano y las celdas son de tipo *UMi*. Los parámetros del escenario se encuentran en la Tabla 7. Al ser el entorno urbano y estar densificado, se ha escogido una potencia de transmisión de 23.98 dBm y una frecuencia de portadora de 65 GHz. El número de celdas se va aumentando de 10 a 500. Para cada cantidad de celdas se ha realizado una simulación distinta. En total se han realizado 21 simulaciones y se han analizado sus resultados de manera conjunta. Primero el aumento se produce de 10 en 10 celdas, después de 20 en 20 y por último de 50 en 50. Se ha realizado de esta manera porque en un principio sólo se iba a evaluar el escenario con un máximo de 100

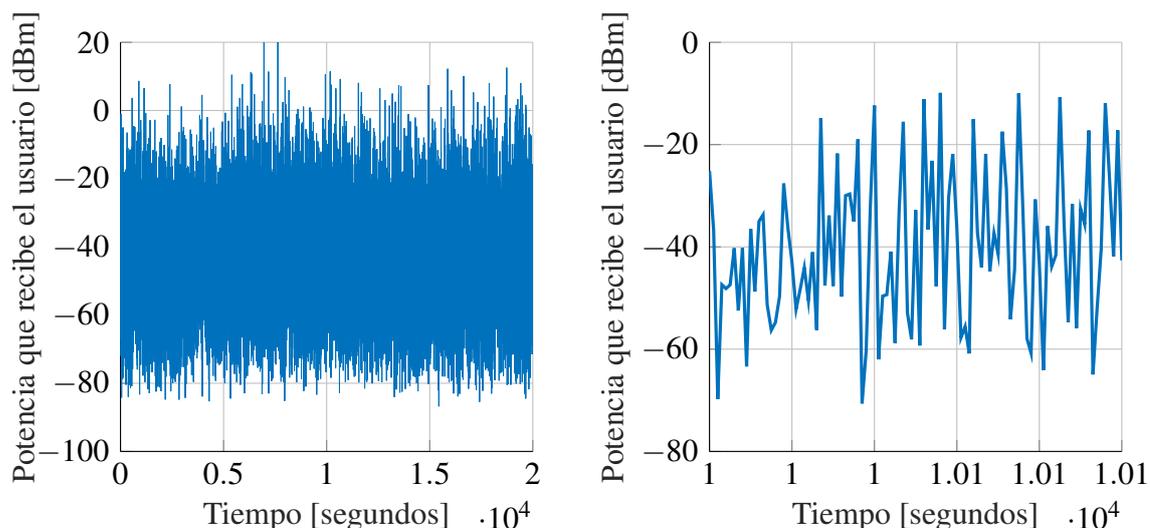


Figura 23: Gráfica de la potencia recibida por el usuario en el escenario D

celdas, pero a la vista de los resultados se decidió aumentar el número de celdas, esta vez de manera más rápida, buscando la convergencia de los resultados. Debido a la gran cantidad de usuarios y celdas existentes en este escenario, las simulaciones toman tiempo y generan archivos de resultados grandes. Para facilitar el manejo de los datos, se han realizado 100 iteraciones por cada simulación. Los resultados que se muestran se han calculado haciendo la media de las 100 realizaciones por los 1000 usuarios, por lo que aunque haya menos realizaciones, la cantidad de medidas es superior a la de los escenarios anteriores.

En la Figura 24 se muestra un diagrama con la disposición de usuarios y celdas en el escenario. Este diagrama muestra el último caso, en el que se despliegan 500 celdas. El tamaño del escenario es un cuadrado de 2 kilómetros de lado.

En la Figura 25 se muestra una gráfica donde se representa el número medio de usuarios que se conectan a cada celda para cada número de celdas. Al principio, se observa una subida brusca del número de usuarios, para después caer de manera gradual. Esto se debe a que al principio las pocas celdas que hay no cubren todo el espacio de los usuarios y muchos de ellos se quedan sin conexión. Una vez se llega a 20 celdas desplegadas, estas ya cubren la mayor parte del escenario y las que se añaden sucesivamente alivian la carga de las demás. Este valor medio cae de manera cada vez más lenta, mostrando una tendencia a estabilizarse a partir de 500 celdas. Este resultado es coherente ya que llegado a un punto en el que el

Tabla 7: Parámetros de la simulación en el escenario E

	Parámetro	Valor	Unidades
Celda	Potencia transmitida	23.98	dBm
	Frecuencia de portadora	65	GHz
	Tipo de celda	UMi	-
	Número de celdas	10 - 500	-
	Altura de la antena de las celdas	10	metros
Escenario	Número de usuarios	1000	metros
	Altura de la antena de los usuarios	1.5	metros
	Número de fotografías de cada simulación	100	-

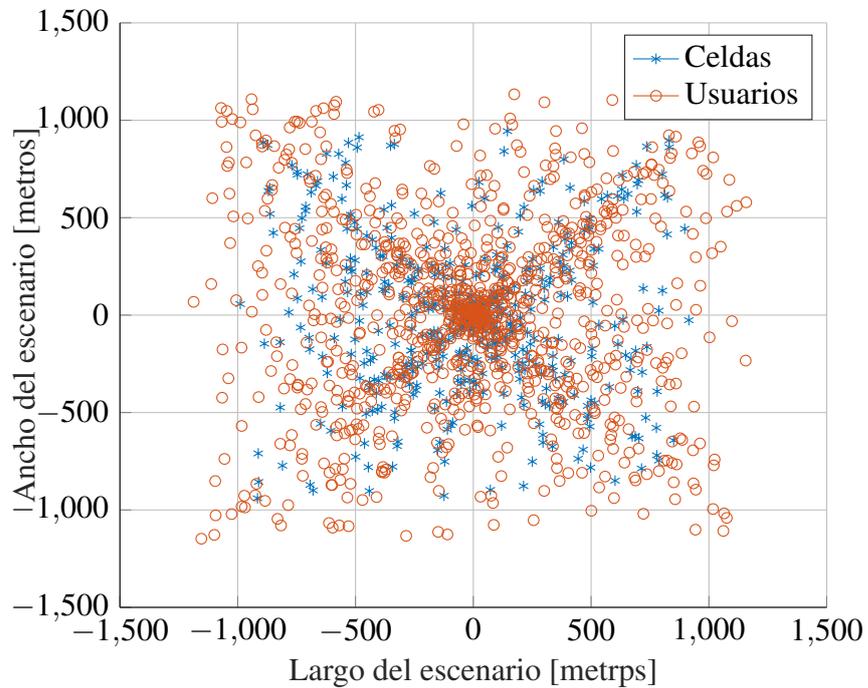


Figura 24: Diagrama de la disposición de los elementos en el escenario E

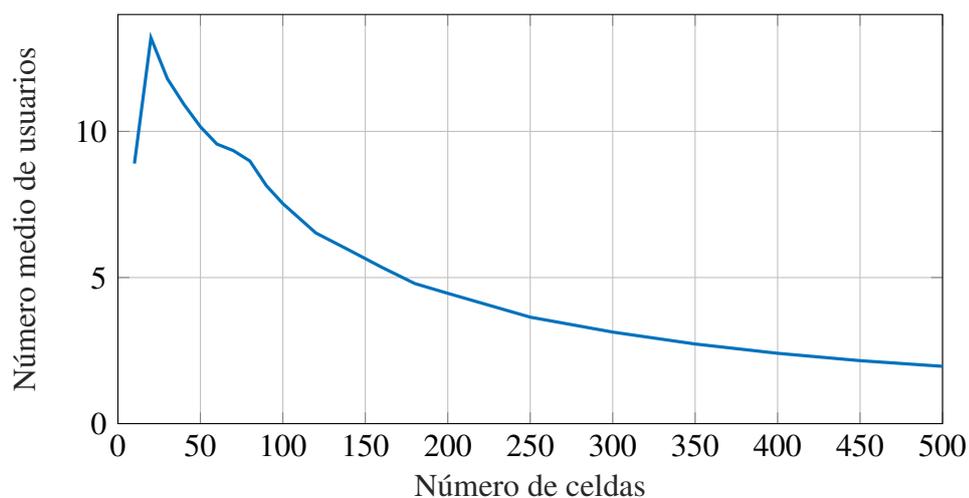


Figura 25: Número medio de usuarios por celda dependiendo del número de celdas en el escenario E

número de celdas empieza a acercarse al número de usuarios, no tiene sentido añadir más celdas, porque se desaprovechan sus recursos.

En las Figuras 26 y 27 se muestran, respectivamente y con el número de celdas, la potencia media que reciben los usuarios y el porcentaje del tiempo que los mismos están conectados a una celda. Estas dos gráficas tienen la misma forma y crecen de manera rápida al principio y de manera más suave al final. Este resultado es coherente ya que en este escenario la selección de acceso se basa sólo en la potencia.

En la Figura 26 se observa que con 10 celdas la potencia media es menor de -120 dBm, por lo que es normal que en la Figura 27 los usuarios estén conectados menos del 20% del tiempo. Con 500 celdas la potencia media recibida es de -65 dBm y el porcentaje de tiempo de conexión de los usuarios es del 92%. Con este tipo de celdas, aunque la potencia media esté muy por encima del umbral de -100 dBm, el porcentaje de conectividad aún está relativamente lejos de llegar al 100%.

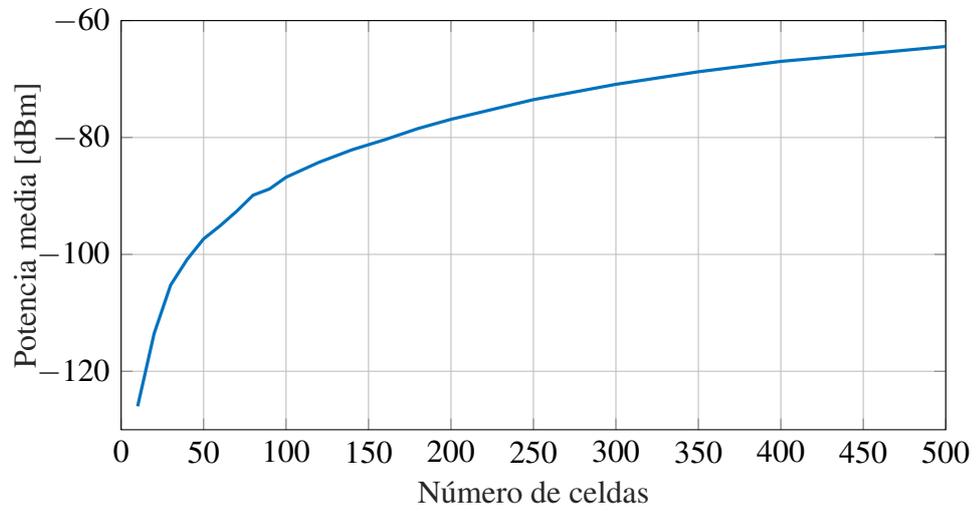


Figura 26: Potencia media que reciben los usuarios dependiendo del número de celdas en el escenario E

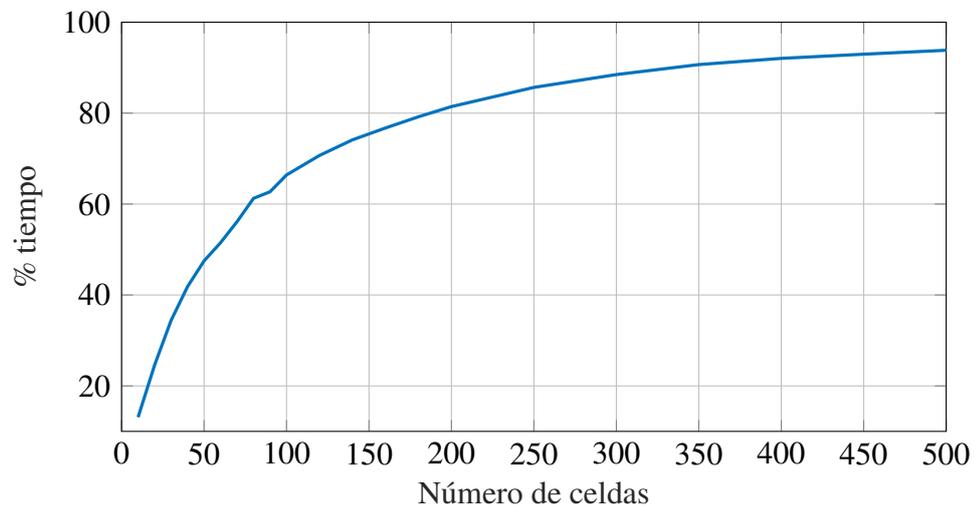


Figura 27: Porcentaje del tiempo que están los usuarios conectados dependiendo del número de celdas en el escenario E

5 Conclusiones

La definición de las tecnologías 5G está estrechamente ligada a los requisitos impuestos por servicios, tanto presentes como futuros. A fin de asegurar que, de forma efectiva, el conjunto de tecnologías que darán lugar a 5G poseen las características necesarias, es indispensable analizar su rendimiento en entornos realistas. Si bien, los despliegues reales ofrecen unos resultados muy fiables, su dimensión se limita debido a, entre otros factores, el coste. Por otro lado, las herramientas de simulación, si bien no proporcionan resultados tan fiables como los despliegues, permiten el análisis de escenarios complejos y proporcionan información útil sobre el rendimiento esperado de la tecnología. En este trabajo se han implementado y analizado, sobre diversos escenarios, modelos de simulación de tecnología mmW, que está llamada a ser uno de los habilitadores de las redes 5G.

En concreto, se han implementado los modelos de propagación publicados por el ETSI para frecuencias de entre 0.5 y 100 GHz. Estos modelos han sido integrados a la plataforma GWNSyM, la cual se ha utilizado para obtener todos los resultados de este trabajo. Además de integrar dichos modelos, se han modelado usuarios y celdas, y se han definido un conjunto de escenarios de análisis.

Se ha validado la implementación de los modelos, presentando su respuesta en un escenario de prueba. Además esto ha permitido ver cómo son las pérdidas, su valor medio, los valores máximos y mínimos que pueden tomar y cómo varían con la distancia, así como la respuesta de los diferentes tipos de celda.

Se han definido escenarios de interés para estas nuevas tecnologías y se ha evaluado su comportamiento en diferentes condiciones.

Por una parte, destaca la importancia del uso de las celdas de tipo *Indoor Hotspot* para dar cobertura en el interior de edificios, debido a la gran pérdida que sufren las ondas milimétricas al penetrar en los mismos. Además, la gran cantidad de dispositivos conectados demandando alta capacidad va a requerir el despliegue de muchas micro o picoceldas, por lo que tiene sentido que muchas de ellas sean de interior.

Por otra parte, destaca la importancia de una selección de acceso basada no sólo en la potencia recibida, si no en más información como el tipo de celda, la carga de la misma y las necesidades del usuario. La virtualización de funciones de red es una tecnología clave en este aspecto. Con la integración de la misma, las celdas se pueden coordinar entre ellas y con el usuario para configurar los enlaces de manera óptima. Por ejemplo, manteniendo el downlink con la celda macro, y cambiando el uplink a la celda micro más cercana. De esta manera se podría repartir la carga de manera más equitativa entre las microceldas, asumiendo que la celda macro tiene más capacidad que las micro.

También se ha observado que aumentando el número de celdas en un escenario densificado se mejora la potencia media recibida por los usuarios y el porcentaje del tiempo que éstos están conectados. Por otro lado, también se ha podido ver que no tiene sentido aumentar el número de celdas de manera indefinida, sino que para encontrar un valor óptimo habría que tener en cuenta otros factores como la relación entre la potencia media recibida y la capacidad del enlace, de forma que las celdas no estén sobrecargadas ni poco cargadas. En cuanto al porcentaje de tiempo que las celdas están sin conexión, el uso de una macrocelda que de cobertura en estos casos podría ser la solución adecuada.

Por último, es preciso que los protocolos de las capas superiores se adapten a variaciones bruscas de la capacidad de enlace, e incluso a desconexiones de corta duración. En concreto, la inestabilidad del canal físico podría tener efectos notables sobre los algoritmos del control de congestión de TCP.

5.1. Líneas futuras

Como se ha comentado anteriormente, en este trabajo se han implementado los modelos centrales que permitan posteriores estudios de redes basadas en mmW. De este modo, a partir de este trabajo se aparecen una serie de líneas de de trabajo, entre las que destacan:

- Implementación de las antenas millimeter-wave en la plataforma: como se comentó anteriormente, la implementación descrita en este trabajo se ha centrado en los modelos de propagación, mientras que el modelado de las antenas se ha simplificado, asumiendo *beamforming* ideal. Sin embargo, la implementación de modelos de antena

más avanzados permitirían obtener resultados más precisos.

- Análisis de esquemas de selección de acceso: uno de los principales problemas que se desprende del análisis realizado en este trabajo es que en escenarios heterogéneos una selección de acceso clásica basada en potencia recibida no permite balancear la carga. Por ello, resulta interesante estudiar otros esquemas de selección, tales como Cell Range Extension (CRE) o Downlink-Uplink Decoupling (DUDe).
- Integración con 4G: la herramienta de simulación dispone de modelos de tecnología 4G. En este sentido es interesante el análisis de la combinación de ambas tecnologías (4G y mmW) sobre un mismo escenario. De hecho, este tipo de escenario donde 4G proporciona una cobertura global y mmW aumenta la capacidad de forma local, es uno de los escenarios más probables en despliegues reales.

Bibliografía

- [1] 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.1.1 Release 14). Inf. téc. RTR/TSGR-0138901v11. 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex, FRANCE: European Telecommunications Standard Institute, ene. de 2006, pág. 3. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/14.01.01_60/tr_138901v140101p.pdf.
- [2] S. Abdelwahab y col. “Network function virtualization in 5G”. En: *IEEE Communications Magazine* 54.4 (abr. de 2016), págs. 84-91. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7452271.
- [3] Luis Francisco Diez Fernández. “Análisis y desarrollo de mejoras para la reducción a la exposición a campos electromagnéticos en redes heterogéneas”. Tesis doct. Mayo de 2018. URL: <http://hdl.handle.net/10902/13778>.
- [4] Luis Diez, Sergio Izuel y Ramón Agüero. “Generic Wireless Network System Modeler: - Fostering the Analysis of Complex LTE Deployments”. En: *Mobile Networks and Management - 8th International Conference, MONAMI 2016, Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 23-24, 2016, Revised Selected Papers*. 2016, págs. 131-145. DOI: 10.1007/978-3-319-52712-3_10. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52712-3_10.
- [5] U. Karabulut y col. “Spatial and Temporal Channel Characteristics of 5G 3D Channel Model with Beamforming for User Mobility Investigations”. En: *IEEE Communications Magazine* 56.12 (dic. de 2018), págs. 38-45. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1800218.
- [6] G. H. Sim y col. “5G Millimeter-Wave and D2D Symbiosis: 60 GHz for Proximity-Based Services”. En: *IEEE Wireless Communications* 24.4 (ago. de 2017), págs. 140-145. ISSN: 1536-1284. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600098.
- [7] Y. Wang y col. “5G Mobile: Spectrum Broadening to Higher-Frequency Bands to Support High Data Rates”. En: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 9.3 (sep. de 2014), págs. 39-46. ISSN: 1556-6072. DOI: 10.1109/MVT.2014.2333694.

- [8] A. Yadav y O. A. Dobre. “All Technologies Work Together for Good: A Glance at Future Mobile Networks”. En: *IEEE Wireless Communications* 25.4 (ago. de 2018), págs. 10-16. ISSN: 1536-1284. DOI: 10.1109/MWC.2018.1700404.

Apéndice

Anexo I

Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[1], páginas 26 - 29.

Scenario	LOS/NLOS	Pathloss [dB], f_c is in GHz and d is in meters, see note 6	Shadow fading std [dB]	Applicability range, antenna height default values
RMa	LOS	$PL_{\text{RMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d_{\text{BP}} \\ PL_2 & d_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 10\text{km} \end{cases}, \text{ see note 5}$ $PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h)d_{3D}$ $PL_2 = PL_1(d_{\text{BP}}) + 40 \log_{10}(d_{3D} / d_{\text{BP}})$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$ $\sigma_{\text{SF}} = 6$	$h_{\text{BS}} = 35\text{m}$ $h_{\text{UT}} = 1.5\text{m}$ $W = 20\text{m}$ $h = 5\text{m}$ $h = \text{avg. building height}$ $W = \text{avg. street width}$ The applicability ranges:
	NLOS	$PL_{\text{RMa-NLOS}} = \max(PL_{\text{RMa-LOS}}, PL'_{\text{RMa-NLOS}})$ for $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$ $PL'_{\text{RMa-NLOS}} = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{\text{BS}})^2) \log_{10}(h_{\text{BS}}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{\text{BS}}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(11.75h_{\text{UT}}))^2 - 4.97)$	$\sigma_{\text{SF}} = 8$	$5\text{m} \leq h \leq 50\text{m}$ $5\text{m} \leq W \leq 50\text{m}$ $10\text{m} \leq h_{\text{BS}} \leq 150\text{m}$ $1\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 10\text{m}$
UMa	LOS	$PL_{\text{UMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2 & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}, \text{ see note 1}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{\text{BP}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2)$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 25\text{m}$
	NLOS	$PL_{\text{UMa-NLOS}} = \max(PL_{\text{UMa-LOS}}, PL'_{\text{UMa-NLOS}})$ for $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$ $PL'_{\text{UMa-NLOS}} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{\text{UT}} - 1.5)$	$\sigma_{\text{SF}} = 6$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 25\text{m}$ Explanations: see note 3
		Optional PL = $32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{\text{SF}} = 7.8$	
UMi - Street Canyon	LOS	$PL_{\text{UMi-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2 & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}, \text{ see note 1}$ $PL_1 = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9.5 \log_{10}((d'_{\text{BP}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2)$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 10\text{m}$

	NLOS	$PL_{\text{UMi-NLOS}} = \max(PL_{\text{UMi-LOS}}, PL'_{\text{UMi-NLOS}})$ <p style="text-align: center;">for $10\text{m} \leq d_{2\text{D}} \leq 5\text{km}$</p> $PL'_{\text{UMi-NLOS}} = 35.3 \log_{10}(d_{3\text{D}}) + 22.4$ $+ 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{\text{UT}} - 1.5)$	$\sigma_{\text{SF}} = 7.82$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 10\text{m}$ Explanations: see note 4
		Optional $PL = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 31.9 \log_{10}(d_{3\text{D}})$	$\sigma_{\text{SF}} = 8.2$	
InH - Office	LOS	$PL_{\text{InH-LOS}} = 32.4 + 17.3 \log_{10}(d_{3\text{D}}) + 20 \log_{10}(f_c)$	$\sigma_{\text{SF}} = 3$	$1\text{m} \leq d_{3\text{D}} \leq 100\text{m}$
	NLOS	$PL_{\text{InH-NLOS}} = \max(PL_{\text{InH-LOS}}, PL'_{\text{InH-NLOS}})$ $PL'_{\text{InH-NLOS}} = 38.3 \log_{10}(d_{3\text{D}}) + 17.30 + 24.9 \log_{10}(f_c)$	$\sigma_{\text{SF}} = 8.03$	$1\text{m} \leq d_{3\text{D}} \leq 86\text{m}$
		Optional $PL'_{\text{InH-NLOS}} = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 31.9 \log_{10}(d_{3\text{D}})$	$\sigma_{\text{SF}} = 8.29$	$1\text{m} \leq d_{3\text{D}} \leq 86\text{m}$
<p>Note 1: Breakpoint distance $d_{\text{BP}} = 4 h_{\text{BS}} h_{\text{UT}} f_c / c$, where f_c is the centre frequency in Hz, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s is the propagation velocity in free space, and h_{BS} and h_{UT} are the effective antenna heights at the BS and the UT, respectively. The effective antenna heights h_{BS} and h_{UT} are computed as follows: $h_{\text{BS}} = h_{\text{BS}} - h_{\text{E}}$, $h_{\text{UT}} = h_{\text{UT}} - h_{\text{E}}$, where h_{BS} and h_{UT} are the actual antenna heights, and h_{E} is the effective environment height. For UMi $h_{\text{E}} = 1.0\text{m}$. For UMa $h_{\text{E}} = 1\text{m}$ with a probability equal to $1/(1+C(d_{2\text{D}}, h_{\text{UT}}))$ and chosen from a discrete uniform distribution uniform(12,15,...,($h_{\text{UT}}-1.5$)) otherwise. With $C(d_{2\text{D}}, h_{\text{UT}})$ given by</p> $C(d_{2\text{D}}, h_{\text{UT}}) = \begin{cases} 0 & , h_{\text{UT}} < 13\text{m} \\ \left(\frac{h_{\text{UT}} - 13}{10} \right)^{1.5} g(d_{2\text{D}}) & , 13\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 23\text{m} \end{cases}$ <p>where</p> $g(d_{2\text{D}}) = \begin{cases} 0 & , d_{2\text{D}} \leq 18\text{m} \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2\text{D}}}{100} \right)^3 \exp\left(\frac{-d_{2\text{D}}}{150} \right) & , 18\text{m} < d_{2\text{D}} \end{cases}$ <p>Note that h_{E} depends on $d_{2\text{D}}$ and h_{UT} and thus needs to be independently determined for every link between BS sites and UTs. A BS site may be a single BS or multiple co-located BSs.</p> <p>Note 2: The applicable frequency range of the PL formula in this table is $0.5 < f_c < f_{\text{H}}$ GHz, where $f_{\text{H}} = 30$ GHz for RMa and $f_{\text{H}} = 100$ GHz for all the other scenarios. It is noted that RMa pathloss model for >7 GHz is validated based on a single measurement campaign conducted at 24 GHz.</p> <p>Note 3: UMa NLOS pathloss is from TR36.873 with simplified format and $PL_{\text{UMa-LOS}} = \text{Pathloss of UMa LOS outdoor scenario}$.</p> <p>Note 4: $PL_{\text{UMi-LOS}} = \text{Pathloss of UMi-Street Canyon LOS outdoor scenario}$.</p> <p>Note 5: Break point distance $d_{\text{BP}} = 2\pi h_{\text{BS}} h_{\text{UT}} f_c / c$, where f_c is the centre frequency in Hz, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s is the propagation velocity in free space, and h_{BS} and h_{UT} are the antenna heights at the BS and the UT, respectively.</p> <p>Note 6: f_c denotes the center frequency normalized by 1GHz, all distance related values are normalized by 1m, unless it is stated otherwise.</p>				

7.4.2 LOS probability

The Line-Of-Sight (LOS) probabilities are given in Table 7.4.2-1.

Table 7.4.2-1 LOS probability

Scenario	LOS probability (distance is in meters)
RMa	$\Pr_{\text{LOS}} = \begin{cases} 1 & , d_{2\text{D-out}} \leq 10\text{m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-out}} - 10}{1000}\right) & , 10\text{m} < d_{2\text{D-out}} \end{cases}$
UMi - Street canyon	$\Pr_{\text{LOS}} = \begin{cases} 1 & , d_{2\text{D-out}} \leq 18\text{m} \\ \frac{18}{d_{2\text{D-out}}} + \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-out}}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2\text{D-out}}}\right) & , 18\text{m} < d_{2\text{D-out}} \end{cases}$
UMa	$\Pr_{\text{LOS}} = \begin{cases} 1 & , d_{2\text{D-out}} \leq 18\text{m} \\ \frac{18}{d_{2\text{D-out}}} + \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-out}}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2\text{D-out}}}\right) \left[1 + C'(h_{\text{UT}}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2\text{D-out}}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-out}}}{150}\right)\right] & , 18\text{m} < d_{2\text{D-out}} \end{cases}$ <p>where</p> $C'(h_{\text{UT}}) = \begin{cases} 0 & , h_{\text{UT}} \leq 13\text{m} \\ \left(\frac{h_{\text{UT}} - 13}{10}\right)^{1.5} & , 13\text{m} < h_{\text{UT}} \leq 23\text{m} \end{cases}$
Indoor - Mixed office	$\Pr_{\text{LOS}} = \begin{cases} 1 & , d_{2\text{D-in}} \leq 1.2\text{m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-in}} - 1.2}{4.7}\right) & , 1.2\text{m} < d_{2\text{D-in}} < 6.5\text{m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-in}} - 6.5}{32.6}\right) \cdot 0.32 & , 6.5\text{m} \leq d_{2\text{D-in}} \end{cases}$
Indoor - Open office	$\Pr_{\text{LOS}} = \begin{cases} 1 & , d_{2\text{D-in}} \leq 5\text{m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-in}} - 5}{70.8}\right) & , 5\text{m} < d_{2\text{D-in}} \leq 49\text{m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2\text{D-in}} - 49}{211.7}\right) \cdot 0.54 & , 49\text{m} < d_{2\text{D-in}} \end{cases}$
Note:	The LOS probability is derived with assuming antenna heights of 3m for indoor, 10m for UMi, and 25m for UMa

7.4.3 O2I penetration loss

7.4.3.1 O2I building penetration loss

The pathloss incorporating O2I building penetration loss is modelled as in the following:

$$\text{PL} = \text{PL}_b + \text{PL}_{\text{tw}} + \text{PL}_{\text{in}} + N(0, \sigma_p^2) \quad (7.4-2)$$

where PL_b is the basic outdoor path loss given in Subclause 7.4.1, where $d_{3\text{D}}$ is replaced by $d_{3\text{D-out}} + d_{3\text{D-in}}$.

PL_{tw} is the building penetration loss through the external wall, PL_{in} is the inside loss dependent on the depth into the building, and σ_p is the standard deviation for the penetration loss.

PL_{tw} is characterized as:

$$PL_{tw} = PL_{npi} - 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N \left(p_i \times 10^{\frac{L_{material_i}}{-10}} \right) \quad (7.4-3)$$

PL_{npi} is an additional loss is added to the external wall loss to account for non-perpendicular incidence;

$L_{material_i} = a_{material_i} + b_{material_i} \cdot f$, is the penetration loss of material i , example values of which can be found in

Table 7.4.3-1; p_i is proportion of i -th materials, where $\sum_{i=1}^N p_i = 1$; and N is the number of materials.

Table 7.4.3-1: Material penetration losses

Material	Penetration loss [dB]
Standard multi-pane glass	$L_{\text{glass}} = 2 + 0.2f$
IRR glass	$L_{\text{IRglass}} = 23 + 0.3f$
Concrete	$L_{\text{concrete}} = 5 + 4f$
Wood	$L_{\text{wood}} = 4.85 + 0.12f$
Note:	f is in GHz

Table 7.4.3-2 gives PL_{tw} , PL_{in} and σ_P for two O2I penetration loss models. The O2I penetration is UT-specifically generated, and is added to the SF realization in the log domain.

Table 7.4.3-2: O2I building penetration loss model

	Path loss through external wall: PL_{tw} in [dB]	Indoor loss: PL_{in} in [dB]	Standard deviation: σ_P in [dB]
Low-loss model	$5 - 10 \log_{10} \left(0.3 \cdot 10^{\frac{-L_{\text{glass}}}{10}} + 0.7 \cdot 10^{\frac{-L_{\text{concrete}}}{10}} \right)$	$0.5 d_{2D-in}$	4.4
High-loss model	$5 - 10 \log_{10} \left(0.7 \cdot 10^{\frac{-L_{\text{IRglass}}}{10}} + 0.3 \cdot 10^{\frac{-L_{\text{concrete}}}{10}} \right)$	$0.5 d_{2D-in}$	6.5

d_{2D-in} is minimum of two independently generated uniformly distributed variables between 0 and 25 m for UMa and UMi-Street Canyon, and between 0 and 10 m for RMa. d_{2D-in} shall be UT-specifically generated.

Both low-loss and high-loss models are applicable to UMa and UMi-Street Canyon.

Only the low-loss model is applicable to RMa.

The composition of low and high loss is a simulation parameter that should be determined by the user of the channel models, and is dependent on the use of metal-coated glass in buildings and the deployment scenarios. Such use is expected to differ in different markets and regions of the world and also may increase over years to new regulations and energy saving initiatives. Furthermore, the use of such high-loss glass currently appears to be more predominant in commercial buildings than in residential buildings in some regions of the world (see note).

Note: One example survey for the US market can be found in [5]. The survey does not necessarily be representative for all the scenarios. Other ratios outside of the survey should not be precluded.

For backwards compatibility with TR 36.873 [3], the following building penetration model should be used for UMa and UMi single-frequency simulations at frequencies below 6 GHz.