



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Generación y evaluación de formas de onda en un
transmisor 5G con agregación de señales banda
ancha-estrecha

*Generation and evaluation of waveforms in a
5G-transmitter with aggregation of narrowband
and broadband signals*

Autor

Víctor Mustieles Pérez

Directora

Paloma García Dúcar

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2020

Generación y evaluación de formas de onda en un transmisor 5G con agregación de señales de banda ancha-estrecha

RESUMEN

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) es el estudio y evaluación de los nuevos esquemas de transmisión que surgen en los sistemas de comunicaciones móviles actualmente en desarrollo. En estos sistemas, además de los servicios clásicos de voz y datos, se requiere prestar una serie de servicios avanzados, como pueden ser los relativos a *Internet of Things* (IoT), comunicaciones vehiculares o comunicaciones para misión crítica, para los cuales se precisa integrar señales de banda ancha con otras de banda estrecha. Estos servicios se empezaron a introducir en los sistemas de Cuarta Generación (4G) debido a la versatilidad de la modulación *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) y se espera que sean los de Quinta Generación (5G) los que den una respuesta completa a los mismos.

Para la consecución de los objetivos expuestos, se proponen dos simuladores implementados en el entorno software MATLAB[®], que permiten generar las señales características del estándar 5G, agregadas con otras de distinta naturaleza. Estos, además, son un resultado fundamental de este trabajo, ya que constituyen una herramienta que puede resultar muy útil para estudios futuros. Ambos posibilitan la reconfiguración de una gran variedad de parámetros, especialmente aquellos de la capa física, por ser los más influyentes en lo que queremos analizar. Se incluyen, además, una serie de extras orientados a una caracterización más precisa de la realidad, como son el modelado de sistemas no lineales o del canal de transmisión. A partir de todo esto, se generarán diversos escenarios y se evaluará el comportamiento y prestaciones del sistema en base a medidas de linealidad y distorsión en banda.

Por último, se determinará, a partir de los resultados obtenidos, cuáles serían las condiciones y configuraciones óptimas de transmisión según el caso, para escenarios avanzados en los que intervienen tanto señales de banda ancha como de banda estrecha, mejorando así la eficiencia y prestaciones de las comunicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar estas líneas para agradecer no sólo a las personas que han hecho posible la realización de este trabajo, sino a todas aquellas que me han acompañado y ayudado a llegar hasta aquí.

A mi familia, gracias por confiar en mí y apoyarme en todo momento.

A la directora de este TFG, Paloma, por su total predisposición e interés, tanto en la realización de este trabajo como en el resto asignaturas que hemos compartido. Gracias también a Toni, por toda la ayuda prestada.

A mis amigos, compañeros de carrera y compañeros de laboratorio.

Agradecer también a la Cátedra Mobility City de la Universidad de Zaragoza, por la confianza depositada en este proyecto y por la beca concedida para la realización del mismo.

Índice General

Lista de acrónimos	VII
Introducción	IX
1 Fundamentos teóricos 5G	1
1.1 Punto de partida: LTE-Advanced	1
1.1.1 Interfaz radio y parámetros principales	1
1.1.2 Canales y señales físicas	5
1.1.3 Estructura de la transmisión	7
1.2 Nuevos esquemas de transmisión: 5G-NR	9
1.2.1 Rangos de frecuencia	9
1.2.2 Modulaciones	9
1.2.3 Numerologías y anchos de banda	10
1.2.4 Generación de la señal	10
1.2.5 Canales y señales de la capa física	11
1.3 NB-IoT	13
1.3.1 Generación de las señales NB-IoT	13
1.3.2 Modos de funcionamiento	14
1.3.3 Canales y señales de la capa física	16
1.3.4 Estructuras de trama	16
2 Implementación del simulador	19
2.1 Diagrama de bloques	19
2.2 Modelado del amplificador	20
2.2.1 Modelo de amplificador sin memoria	21
2.2.2 Modelo de amplificador con memoria	22
2.2.3 Predistorsión digital	23
2.3 Modelado de fibra óptica	26
2.4 Modelado del canal	27
2.5 Medidas de evaluación de resultados	29

2.5.1	PAPR	30
2.5.2	ACLR	30
2.5.3	EVM	30
2.5.4	BER	31
2.6	Interfaz del simulador	31
2.6.1	Posibilidades de generación de la señal	32
2.6.2	Representaciones	33
2.6.3	Modelado de elementos no lineales	37
2.6.4	Modos de evaluación	37
3	Evaluación de resultados	39
3.1	Consideraciones previas	39
3.2	Escenario 1: PRB en el medio del BW, no adyacente con canales IoT.	41
3.3	Escenario 2: PRB en el medio del BW, adyacente a un canal IoT	43
3.4	Escenario 3: PRB en un extremo del BW, con canales NB-IoT en banda de guarda	44
3.5	Escenario 4: Canal IoT transmitido en banda	45
3.6	Escenario 5: Canal IoT transmitido en banda de guarda	46
3.7	Escenario 6: Evaluación del compromiso EVM/ACLR	48
3.8	Escenario 7: Evaluación de los efectos al cambiar de numerología	51
3.9	Escenario 8: Simulación de modelos de canal	52
3.10	Recopilación de resultados	53
4	Conclusiones	55
4.1	Conclusión	55
4.2	Cronología	56
4.3	Líneas futuras de trabajo	57
	Bibliografía	59
	Anexos	63
A	Guías de usuario	65
A.1	Simulador 5G - NB-IoT	66
A.1.1	Inicio de la aplicación	66
A.1.2	Sistema transmisor	66
A.1.3	Canal de transmisión	72
A.1.4	Visualización de resultados del transmisor	74
A.1.5	Sistema receptor	79

A.1.6	Menús	80
A.2	Simulador 5G-NR	82
A.2.1	Inicio de la aplicación	83
A.2.2	Configuración de la señal	84
A.2.3	Modelo de elementos no lineales	85
A.2.4	Modelo de canal	86
A.2.5	Visualización de resultados	87
A.2.6	Menús	88
B	Resultados de las simulaciones	91
B.1	Escenario 1: PRB en el medio del BW, no adyacente con canales IoT	92
B.2	Escenario 2: PRB en el medio del BW, adyacente a un canal IoT . . .	93
B.3	Escenario 3: PRB en el extremo del BW, con canales IoT en banda de guarda.	94
B.4	Escenario 4: Canal IoT transmitido en banda	96
B.5	Escenario 5: Canal IoT transmitido en banda de guarda	97
B.6	Escenario 6: Evaluación del compromiso EVM/ACLR	99
B.7	Escenario 7: Evaluación de los efectos al cambiar de numerología . . .	101
B.8	Escenario 8: Simulación de modelos de canal	104
C	Códigos de MATLAB®	105
D	Hojas de características	123

Lista de Figuras

1	Evolución de las tecnologías LTE-Advanced y 5G-NR para conformar 5G.	XI
1.1	Esquema general en el dominio de la frecuencia de un sistema LTE. Se muestra la estructura de subportadoras activas, inactivas, de datos y para señales de referencia.	2
1.2	Distribución de las unidades básicas de asignación de recursos en un sistema LTE.	3
1.3	Diagrama de bloques básico de un modulador OFDM para señales LTE	4
1.4	Estructura jerárquica de distribución de recursos radio en sistemas LTE.	7
1.5	Estructura básica de distribución de recursos radio en el dominio frecuencial para un sistema LTE.	8
1.6	Estructura básica de tramas en el dominio temporal para duplexado en tiempo en un sistema LTE.	8
1.7	Diagrama de bloques básico de un modulador OFDM para señales 5G-NR	11
1.8	Diagrama de bloques básico de un modulador OFDM para señales NB-IoT.	14
1.9	Modos de operación de un sistema NB-IoT: <i>stand-alone</i> , en banda y en banda de guarda.	14
1.10	Matriz de recursos de un slot en un canal de NB-IoT.	17
1.11	Estructura de trama en los sistemas NB-IoT. Se resalta la diferencia entre tramas pares e impares.	17
1.12	Estructura de organización de las tramas en sistemas NB-IoT.	18
2.1	Diagrama de bloques del Simulador.	20
2.2	Esquema de un predistorsionador digital con aprendizaje indirecto.	24

2.3	Curvas AM/AM sin linealización y con linealización para diversos valores del factor de ganancia G .	25
2.4	Captura de señales a entrada y salida de un sistema no lineal para su posterior modelado.	27
2.5	Ventana del simulador 5G–NB-IoT que permite configurar el canal de propagación.	29
2.6	Ilustración de lo que representa el <i>Error Vector Magnitude</i> y de los parámetros que intervienen en su cálculo.	31
2.7	Interfaz de usuario del simulador 5G–NB-IoT.	32
2.8	Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización.	34
2.9	Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización. Se muestran los niveles de ACLR y la posición de los canales adyacentes para la señal amplificada y linealizada.	34
2.10	Densidad espectral de potencia normalizada de la señal transmitida (izquierda) y ACLR para cada uno de los canales adyacentes (derecha).	35
2.11	Representación en 3D de la señal generada, agregando señales 5G y NB-IoT, antes de pasar por el amplificador. Se muestra una señal 5G con un BW de 15 RB, usándose del 0 al 10 y el 14, con transmisión IoT en banda en el PRB 12.	35
2.12	Representación del EVM en función de tiempo y frecuencia (arriba-izquierda), tiempo (abajo-izquierda), subportadora (arriba-derecha) y RB (abajo-derecha)	36
2.13	Representación la constelación recibida para una simulación con modulación 64-QAM.	36
2.14	Ventana que permite seleccionar las señales usadas para el modelado de elementos no lineales.	37
2.15	Ventana que permite cambiar el modo de funcionamiento del simulador.	38
3.1	Representación gráfica de las diferentes situaciones en las que se pone al PRB de referencia para la evaluación de resultados.	41
3.2	Variación del EVM del PRB de referencia para las 4 situaciones descritas anteriormente. Se considera que todos los PRB tienen la misma potencia.	42

3.3	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 1, variando su potencia	42
3.4	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 1, variando la potencia de los PRBs adyacentes.	43
3.5	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 2, todos los PRB con la misma potencia.	44
3.6	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 3, manteniendo constante la potencia de los PRBs adyacentes.	45
3.7	EVM(%) para un canal de IoT en el escenario 4, manteniendo constante la potencia de los PRBs adyacentes.	45
3.8	EVM(%) para un canal de IoT en el escenario 4, variando la potencia de los PRBs adyacentes.	46
3.9	EVM(%) promedio para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal de banda ancha.	47
3.10	EVM(%) en canales de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cuando se transmiten dos canales en la banda de guarda.	48
3.11	ACLR en el escenario 6 en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1 y sin filtrado	49
3.12	ACLR en el escenario 6 en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1 y filtrado.	50
3.13	Variación del EVM en el escenario 6 al alejar progresivamente el canal IoT de la señal 5G, en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1 y filtrado.	50
3.14	EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria.	52
3.15	ACLR para una señal 5G al cambiar numerología y ancho de banda, usando el modelo NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria 1.	52
3.16	Comparación de la constelación recibida respecto de la ideal en una transmisión a través de un canal EVA con frecuencia Doppler máxima de 30 Hz usando modulación 64-QAM.	53
4.1	Diagrama de Gantt del TFG.	57

A.1	Interfaz de usuario inicial del simulador 5G – NB-IoT con las partes principales de las que consta.	67
A.2	Configuración del número de bloques usados para el simulador 5G – NB-IoT.	68
A.3	Configuración del número de bloques usados para el simulador 5G – NB-IoT en modo avanzado (edición subtrama a subtrama).	69
A.4	Configuración de la potencia relativa de las señales piloto en el simulador 5G – NB-IoT en modo avanzado.	69
A.5	Ventana de agregación de señales NB-IoT en el simulador 5G – NB-IoT. 70	
A.6	Ventana de configuración del modelo de canal de propagación en el simulador 5G – NB-IoT.	73
A.7	Representación de la señal final transmitida en el dominio temporal en el simulador 5G–NB-IoT.	75
A.8	Representación de la señal generada a la entrada del amplificador en el simulador 5G–NB-IoT.	75
A.9	Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización.	76
A.10	Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización. Se muestran los niveles de ACLR y la posición de los canales adyacentes.	76
A.11	Gráficas mostradas en el simulador 5G – NB-IoT en relación a las medidas de ACLR.	77
A.12	Representación de la matriz de recursos de la señal 5G generada en el simulador 5G–NB-IoT. Se usa una configuración con un BW de 1,4 MHz, utilizándose los RB 1, 3 y 4.	78
A.13	Representación de la matriz de recursos de un canal IoT generado en el simulador 5G–NB-IoT.	78
A.14	Representación en 3D de la señal generada, agregando señales 5G y NB-IoT, antes de pasar por el amplificador. Se muestra una señal 5G con un BW de 15 RB, usándose del 0 al 10 y el 14, con transmisión IoT en banda en el PRB 12.	79
A.15	Representación la constelación recibida para una simulación con modulación 64-QAM.	80
A.16	Menú de ayuda en el simulador 5G–NB-IoT.	80
A.17	Ventana de modos de funcionamiento en el simulador 5G–NB-IoT.	81

A.18	Ventana que permite seleccionar las señales usadas para el modelado de los elementos no lineales en el simulador 5G–NB-IoT.	82
A.19	Ventana de exportación de señales en el simulador 5G – NB-IoT.	82
A.20	Interfaz de usuario inicial y partes del simulador 5G-NR.	83
A.21	Ventana de configuración de los modelos de canal de propagación en el simulador 5G-NR.	87
A.22	Detalle representación EVM en el simulador 5G-NR, para el caso vs. símbolo OFDM.	88
B.1	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 2, variando su potencia.	94
B.2	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 3, variando la potencia del PRB de referencia.	95
B.3	EVM(%) máximo para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal 5G.	98
B.4	EVM (%) en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.	99
B.5	ACLR en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.	100
B.6	EVM(%) promedio al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1, no se modelan los efectos del amplificador.	101
B.7	EVM(%) promedio al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2, no se modelan los efectos del amplificador.	102
B.8	EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.	103
B.9	ACLR al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.	104
B.10	Constelación recibida para una transmisión a través de un modelo de canal ETU con frecuencia Doppler máxima de 70 Hz y utilizando modulación 64-QAM (arriba). Resultados de BER obtenidos para dicha transmisión (abajo).	104

Lista de Tablas

1.1	Parámetros principales según el ancho de banda del sistema en LTE.	3
1.2	Rangos de frecuencia definidos para 5G-NR.	9
1.3	Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR1. Se especifica para ellas el número de RB.	10
1.4	Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR2. Se especifica para ellas el número de RB.	11
1.5	PRBs utilizables en los sistemas LTE para transmisión de señales NB-IoT en banda.	15
1.6	Número máximo de canales NB-IoT que se pueden transmitir en la banda de guarda de la señal LTE	15
3.1	Valores de EVM (%) máximos permitidos en función de la modulación según el estándar para LTE/5G.	40
3.2	Valores de EVM (%) máximos permitidos en función de la modulación según el estándar para NB-IoT	40
A.1	Anchos de banda y su correspondiente número de RB permitidos según el estándar.	68
A.2	PRBs utilizables para transmitir señales NB-IoT en banda.	71
A.3	Número máximo de canales NB-IoT que se pueden transmitir en la banda de guarda	71
A.4	Rangos de frecuencia definidos para señales 5G-NR.	84
A.5	Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR1. Se especifica para ellas el número de RB.	85
A.6	Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR2. Se especifica para ellas el número de RB.	85
B.1	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 1, todos los PRB con la misma potencia.	92

B.2	EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 1, variando su potencia.	92
B.3	EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 1, variando su potencia.	92
B.4	EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 1, variando la potencia de los PRBs adyacentes.	93
B.5	EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 1, variando la potencia de los PRBs adyacentes.	93
B.6	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 2, todos los PRB con la misma potencia.	93
B.7	EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 2, variando su potencia.	93
B.8	EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 2, variando su potencia.	94
B.9	EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 3, todos con la misma potencia.	94
B.10	EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 3, variando la potencia del PRB de referencia.	95
B.11	EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 3, variando la potencia del PRB de referencia.	95
B.12	EVM(%) para un canal de IoT en el escenario 4, manteniendo constante la potencia de los PRBs adyacentes.	96
B.13	EVM(%) promedio para un canal de IoT en el escenario 4, variando la potencia de los PRBs adyacentes.	96
B.14	EVM(%) máximo para un canal de IoT en el escenario 4, variando la potencia de los PRBs adyacentes.	96
B.15	EVM(%) promedio para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal de banda ancha.	97
B.16	EVM(%) máximo para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal de banda ancha.	97
B.17	EVM(%) promedio en canales de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes. Se transmiten dos canales en la banda de guarda.	98

B.18 EVM(%) máximo en canales de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes. Se transmiten dos canales en la banda de guarda.	98
B.19 EVM (%) en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.	99
B.20 ACLR en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.	99
B.21 EVM (%) en el escenario 6 en el caso en que se utiliza un modelo de amplificador con memoria 1.	100
B.22 ACLR en el escenario 6 en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1.	100
B.23 EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1, no se modelan los efectos del amplificador. .	101
B.24 EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2, no se modelan los efectos del amplificador. .	101
B.25 EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria de 1.	102
B.26 EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.	102
B.27 ACLR al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria de 1.	103
B.28 ACLR al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.	103

Lista de acrónimos

1G	Primera Generación
2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Cuarta Generación
5G	Quinta Generación
5G-NR	5G-New Radio
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BBU	Baseband Unit
BER	Bit Error Rate
BWP	Bandwidth Part
CDL	Clustered Delay Line
CP	Cyclic Prefix
CCE	Control Channel Element
CFI	Control Format Indicator
CSI	Channel State Information
DCS	Digital Cellular System
DL	DownLink
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eMBB	enhanced Mobile BroadBand
EPA	Extended Pedestrian A
ETU	Extended Typical Urban
EVA	Extended Vehicular A
EVM	Error Vector Magnitude
FDD	Frequency Division Duplexing
GSM	Groupe Special for Mobile
GPRS	General Packet Radio Service
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSPA	High-Speed Packet Access

IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ILA	Indirect Learning Architecture
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
NB-IoT	Narrowband - Internet of Things
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
M2M	Machine to Machine
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	massive Machine Type Communications
MPM	Memory Polynomial Model
NLOS	Non Line Of Sight
PAPR	Peak-to-Average-Power Ratio
PM	Polynomial Model
PRB	Physical Resource Block
PSK	Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature-Phase Shift Keying
RBs	Resource Blocks
RE	Resource Element
RF	Radio-Frequency
RMS	Root Mean Square
RoF	Radio over Fiber
RRH	Remote Radio Head
SCS	Subcarrier Spacing
SISO	Single Input Single Output
TDD	Time Division Duplexing
TDL	Tapped Delay Line
UE	User Equipment
UL	UpLink
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
WCDMA	Wideband Code-Division Multiple Access

Introducción

EL interés en los sistemas de comunicaciones móviles está actualmente experimentando un claro auge, fundamentado principalmente en el sentimiento generalizado de una revolución que va a cambiar el modo de vida de la sociedad en un futuro no muy lejano. Esta revolución es tal por el hecho de que se espera que no se dé en un ámbito concreto, como ha sucedido en otras ocasiones, sino que se prevé sea transversal. Para ponernos en contexto y poder comprenderlo, es necesario mostrar tanto una visión histórica como las perspectivas de futuro que existen.

Evolución Histórica

Los sistemas de comunicaciones móviles actuales son herencia de los primeros estándares analógicos surgidos en los años 80 y que se conocen como la Primera Generación (1G). A partir de entonces, los sistemas de comunicaciones móviles evolucionaron motivados por dos causas fundamentales: el desarrollo de la tecnología y el crecimiento y transformación de los servicios que se necesitaba prestar.

En los años 90, se dio el salto a la Segunda Generación (2G), con los sistemas *Groupe Special for Mobile (GSM)* y *Digital Cellular System (DCS)*. Este cambio lo marca el paso a la tecnología digital, lo que permitió un notable aumento de la capacidad y la introducción de una serie de servicios adicionales al de la voz que dan origen al intercambio de datos. El paso a la Tercera Generación (3G) viene marcado por el aumento de esta capacidad de transmisión. En un primer momento, se trató de evolucionar la tecnología 2G incluyendo redes de conmutación de paquetes sobre la red GSM, con los sistemas *General Packet Radio Service (GPRS)* y *Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)*. Ambas tecnologías no constituían un salto lo suficientemente destacado y rompedor, siendo categorizadas como 2.5G y 2.75G, respectivamente [1].

Ya en el siglo XXI, la creciente demanda de transmisión de información a

causa del aumento del tráfico móvil y al progresivo desarrollo de Internet motiva la aparición del denominado 3G. En estos sistemas la interfaz radio cambia completamente respecto a sus predecesores y se basa en la novedosa multiplexación por código: *Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)*, desarrollada por el foro *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*. La tecnología principal de esta generación es el *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*. Otro aspecto reseñable es que estos sistemas permiten la introducción del concepto de *Quality of Service (QoS)*, clave para el tratamiento de los múltiples y diversos servicios que se empezaban a desarrollar. Como evolución a estos sistemas, surge el *High Speed Packet Access (HSPA)* y, en paralelo, el 3GPP define una nueva tecnología de acceso radio, conocida como *Long-Term Evolution (LTE)*, desarrollada durante la primera década del siglo XXI.

En primera instancia, los sistemas LTE fueron calificados como Cuarta Generación (4G), sin embargo, estas redes no cumplían estrictamente con los requerimientos del *International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced)*, hasta que llegaron las *releases* de LTE-Advanced. La principal novedad de los sistemas LTE es la adopción de un esquema de transmisión basado en *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)*. Este tipo de modulación multiportadora permite dar un soporte eficaz a los nuevos servicios, que necesitan de grandes anchos de banda y de la agregación de señales muy diversas, por lo que será uno de los pilares fundamentales de las comunicaciones móviles actuales [2].

Nuevos Desafíos de las Comunicaciones Móviles

Actualmente y en el futuro más cercano, las redes móviles tienen la difícil tarea de dar respuesta a los cada vez más ambiciosos retos de la sociedad moderna, entre ellos, destaca la gran velocidad con la que está aumentando el número de dispositivos que se necesita interconectar. En este contexto surge la Quinta Generación (5G), desarrollada a lo largo de la segunda década del siglo XXI, y concebida como una evolución total de LTE. La *International Telecommunication Union (ITU)* describe tres tipos de servicios que las nuevas redes 5G deberán satisfacer [3]: *enhanced Mobile BroadBand (eMBB)*, *Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC)* y *massive Machine Type Communications (mMTC)*.

Los servicios eMBB están enfocados a alcanzar picos de tráfico de hasta 10 Gbps

en condiciones de baja movilidad. Estas velocidades permitirán, entre otras cosas, procesamiento de *big data* en tiempo real o aplicaciones de realidad aumentada. Por otra parte, la categoría uRLLC incluye servicios que requieran enviar información importante de manera muy fiable y con una muy baja latencia, como son las comunicaciones para misión crítica o comunicaciones vehiculares. Este último es crucial de cara a que se puedan desarrollar correctamente los proyectos previstos en el ámbito de *Smart cities* y conducción autónoma, como veremos. Esta categoría también tiene mucho que ver con las comunicaciones mMTC, que son la base para las de *Internet of Things (IoT)*. mMTC facilitará la eficiencia y flexibilidad en el intercambio de paquetes para permitir la gestión de una red con una cantidad masiva de dispositivos conectados de forma descoordinada [4]. La siguiente figura resume claramente cómo se llega al 5G a través de estos objetivos [5, p.6]

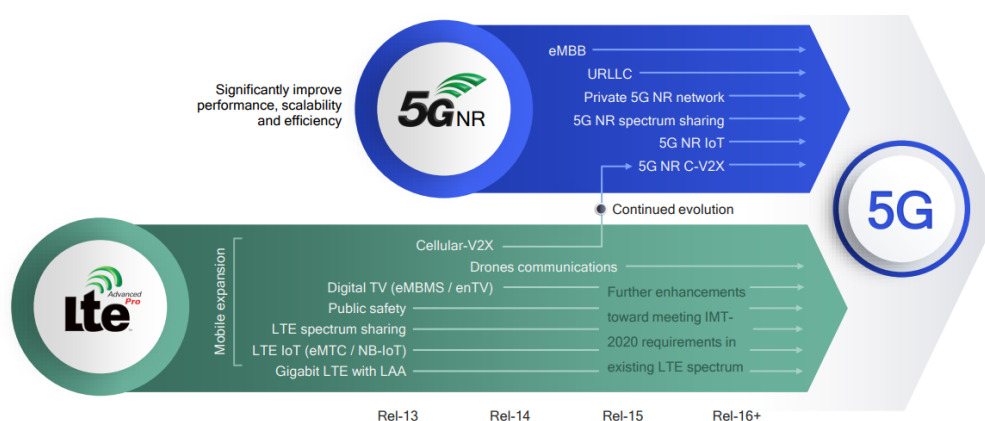


Figura 1: Evolución de las tecnologías LTE-Advanced y 5G-NR para conformar 5G.

Ámbito de aplicación: *Smart cities* y Vehículo conectado

Como vemos, la implantación de las redes 5G supondrán un impacto más allá de un cambio tecnológico en las comunicaciones móviles. La perspectiva generalizada es que 5G tenga un efecto transversal tanto sobre la economía como sobre el conjunto de la sociedad, fundamentado en los aumentos de prestaciones y versatilidad explicados en el párrafo anterior. Los análisis de la Comisión Europea¹ prevén un fuerte impacto en cuatro sectores productivos fundamentales: automoción, salud, transporte y *utilities*. Tal es la magnitud de este impacto, que los beneficios directos e indirectos estimados se elevarían a 113.000 millones de euros en la Unión Europea [6].

¹Estudio SMART 2014/0008: "Identification and quantification of key socio-economic data to support strategic planning for the introduction of 5G in Europe"

El transporte inteligente se postula como una de las grandes aplicaciones que necesita el soporte de las redes 5G. El impulso de estas permitirá una conducción más segura y automatizada basada en el control del entorno exterior en tiempo real. Pero no solo eso, supondrá también un cambio en las propias infraestructuras, carreteras y ciudades, facilitando la gestión optimizada del tráfico y del transporte público. Del mismo modo, aparecerán los territorios inteligentes, futuras *Smart Cities*, gracias a la conectividad global con prestaciones optimizadas ofrecida por 5G. En ellas, la gestión de infraestructuras y servicios ciudadanos dará un giro de 180.º en aras de la ciudadanía y del bien común [7].

Por último, hay que recalcar que, además de mejorar notablemente la calidad de vida de las personas, supondrá un paso fundamental hacia uno de los principales objetivos que tenemos a medio plazo: la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Un reto que será todavía mayor en unos años, puesto que se prevé que en el 2050 un 68 % de la población mundial viva en ciudades.² Para lograrlo, es fundamental la conectividad que proporcionan conjuntamente 5G y las redes IoT y la eficiencia de las mismas, y ese es el principal objetivo del presente TFG.

Motivación y objetivos del trabajo

Las prestaciones de estos sistemas 5G van a depender no sólo del escenario de operación, donde influirá el canal radio, las interferencias presentes, etc., sino también de aspectos que dependen del diseño e implementación práctica de los sistemas transmisores y receptores: desequilibrios I-Q, offset DC, no linealidades del amplificador de potencia, etc. Todo esto influirá, por ejemplo, en la radiación fuera de banda (que aumenta la interferencia en canal adyacente), distorsión dentro de la banda, deterioro de las matrices de precodificación cuando se haga uso de MIMO (*Multiple-input Multiple-output*) o *beamforming* [13], etc. Para poder evaluar el impacto de todos estos efectos, proponer medidas correctoras y cuantificar estas últimas, es necesario contar con un simulador de nivel físico que permita modificar todos los parámetros con los que se configura la generación de la señal.

Por tanto, el primer objetivo del presente TFG es desarrollar un simulador que permita modelar los efectos que van a introducir los diferentes elementos del transmisor, centrándonos en la fuente más importante de distorsión, que es el amplificador de potencia, y en la fibra óptica por el interés que tiene en despliegues

²Según información publicada por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Organización de las Naciones Unidas

de MIMO masivos, los cuales probablemente constituirán la base de los futuros sistemas 5G.

Otro aspecto fundamental, muy relacionado con el anterior, es que todos estos efectos presentes en el transmisor hacen que los valores que obtenemos para los indicadores de calidad que usamos (*Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR)*, *Error Vector Magnitude (EVM)*) dependan no solamente del diseño que hayamos hecho de la cadena transmisora, sino también de cuántas subportadoras se están transmitiendo simultáneamente, en qué posiciones relativas se encuentran y con qué potencia. En 4G y 5G esto es fundamental en dos aspectos: el *scheduling*, que es el reparto dinámico que se realiza de los recursos radio en cada subtrama, y las técnicas de control de interferencias, que pueden requerir transmitir mayor potencia en una parte de la banda que en otra. En este sentido, otro de los objetivos a satisfacer por el simulador es poder configurar qué PRBs (*Physical Resource Blocks*) están ocupados y cuáles no y variar sus potencias cómo se desee.

El último objetivo clave es permitir evaluar la integración de señales de banda estrecha dentro de la transmisión de una señal 4G/5G de banda ancha. Esto es lo que motiva la generación de las señales IoT y todas las pruebas que se realizan en el capítulo 3 de la presente memoria: cómo afecta dónde se ubiquen las señales IoT, cuántas señales IoT simultáneas se podrían transmitir, con qué potencia relativa respecto a los PRB de 4G/5G, etc.

Es importante resaltar también que, en este TFG, no se pretende modelar por completo toda la cadena transmisora. El propósito es dejar diseñada la estructura de la misma en el simulador, de manera que se pueda ir completando fácilmente con otros módulos en el futuro para poder modelar cada elemento y visualizar y evaluar la señal en todos los puntos. Por ello, en el presente trabajo nos centramos en el modelado y evaluación del transmisor, dejando implementada la estructura de canal radio y receptor básicos, con la perspectiva de que puedan ser completados y evaluados más exhaustivamente en un futuro.

Organización de la memoria

Antes de entrar en el grueso del desarrollo del trabajo, vamos a comentar como se ha estructurado teniendo en cuenta los objetivos e hitos fundamentales del mismo:

- **Capítulo 1 - Fundamentos teóricos.** Se presentan los aspectos teóricos fundamentales de la capa física de los estándares de comunicaciones utilizados para el desarrollo de este trabajo: LTE-Advanced, 5G-NR y NB-IoT; así como el procedimiento básico seguido para la modulación de las señales.

- **Capítulo 2 - Implementación del simulador.** En este capítulo se detalla el desarrollo del simulador. Se exponen las diferentes funcionalidades y elementos a modelar y cómo se ha tratado cada uno de ellos. Además, se hace un repaso de las numerosas posibilidades que nos permite a la hora de simular.
- **Capítulo 3 - Evaluación de resultados.** Se plantean los diferentes escenarios y casos de estudio y se exponen los resultados obtenidos para cada uno de ellos.
- **Capítulo 4 - Conclusiones y líneas futuras.** Este capítulo final recoge las conclusiones que se pueden extraer de la realización de este trabajo, su impacto y extrapolación a los sistemas reales y las posibles líneas futuras de trabajo a seguir.

Capítulo 1

Fundamentos teóricos 5G

LA introducción de las modulaciones derivadas de OFDM a partir del estándar 4G permitió un salto notable de prestaciones respecto a su antecesor, basado en WCDMA. Los esquemas de transmisión basados en OFDM no sólo permitieron mayores tasas de transmisión o mayor capacidad para tratar con canales con desvanecimiento sino que, debido a la teórica independencia entre subportadoras, también abrieron la puerta a la integración de señales de diferentes naturalezas orientadas a dar servicios variados.

En este capítulo se detallan los fundamentos teóricos relacionados con los estándares de comunicaciones móviles sobre los que se asienta todo lo desarrollado en el presente trabajo. Partiremos de la base de 4G e introduciremos los cambios y mejoras que aporta 5G. Además, explicaremos los fundamentos del estándar principal que permite la transmisión de estos tipos de señales de banda estrecha. Se va a hacer especial énfasis en lo referente al *downlink*, ya que es el enlace que modelaremos en el simulador, y en la capa física, que es la que nos interesa.

1.1. Punto de partida: LTE-Advanced

Antes de llegar a lo que es el estándar 5G, y para comprender mejor su funcionamiento, es necesario hablar sobre su antecesor, el 4G, cuya principal tecnología es la familia LTE.

1.1.1. Interfaz radio y parámetros principales

1.1.1.1. Aspectos básicos

Como hemos introducido, las transmisiones LTE se fundamentan en OFDM [8, Anexo A]. La tecnología OFDM consiste en usar múltiples portadoras ortogonales

de banda estrecha para poder cubrir grandes anchos de banda. Esto posibilita las transmisiones de banda ancha a través de canales con *fading*, al simplificar mucho la ecualización. En los sistemas LTE, el ancho de banda total se divide en N_{FFT} subportadoras ortogonales separadas entre sí Δf Hz, sin embargo, hay que tener en cuenta que no todas estas subportadoras se utilizan para el transporte de información. Por un lado, sólo N_{used} subportadoras son activas, es decir, transmiten potencia, mientras que el resto quedan inactivas a ambos lados del canal, formando la banda de guarda. Esta es necesaria para limitar las interferencias en canal adyacente, como posteriormente veremos. Por otra parte, algunas de las subportadoras activas se usan para la transmisión de señales de referencia que permitan realizar estimación de canal en recepción. Además, es importante resaltar que la subportadora central no se usa en LTE. Con todo esto, la estructura frecuencial de un sistema LTE tendría un aspecto como el indicado en la figura 1.1 [9, p. 64].

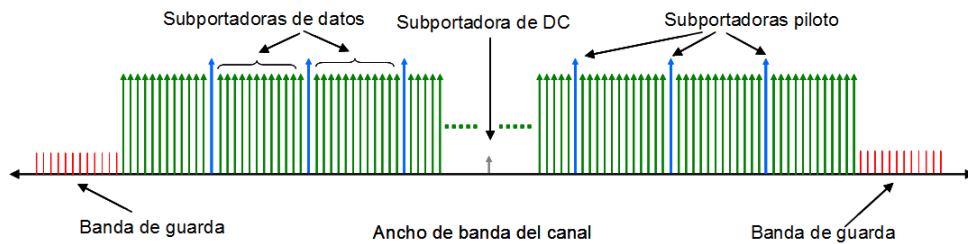


Figura 1.1: Esquema general en el dominio de la frecuencia de un sistema LTE. Se muestra la estructura de subportadoras activas, inactivas, de datos y para señales de referencia.

Esta estructura es importante tenerla en cuenta, ya que es representativa de cómo se realiza la transmisión y de cómo se van a poder integrar en la misma señales de banda estrecha, como se verá más adelante.

Antes de continuar, conviene definir varios conceptos importantes en cuanto a la organización de los recursos radio. La unidad mínima se denomina *Resource Element (RE)* y se compone de una subportadora OFDM durante un símbolo. Estas unidades mínimas se agrupan en otras unidades básicas denominadas *Physical Resource Blocks (RB o PRB)*, compuestas por 12 subportadoras durante 1 slot, como se ilustra en la figura 1.2. En LTE la mínima unidad de asignación es el par de PRB: 12 subportadoras durante una subtrama. Volveremos sobre esto para profundizar en la estructura de tramas en el apartado 1.1.3.

Retomando ahora lo anterior, los anchos de banda posibles para los sistemas LTE vienen fijados por el estándar, cada uno con unos determinados parámetros. Un resumen de los más relevantes aparecen recogidos en la tabla 1.1.

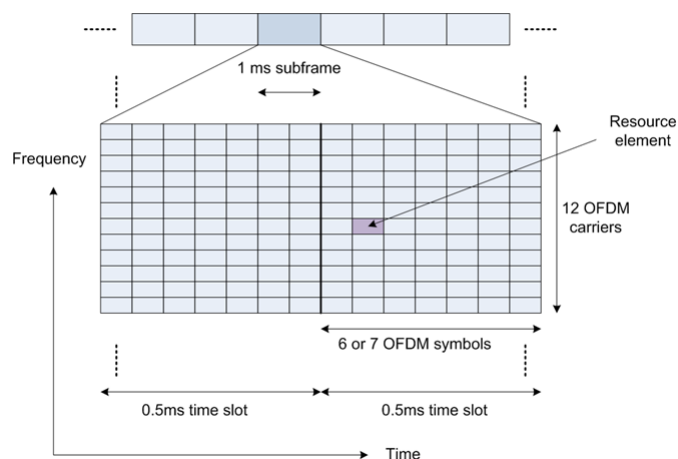


Figura 1.2: Distribución de las unidades básicas de asignación de recursos en un sistema LTE.

Parámetro	Valor					
Canalización (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Separación entre subportadoras (Δf)	15 kHz					
Frecuencia de muestreo (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
N.º de PRBs	6	15	25	50	75	100
N.º de subportadoras útiles	72	180	300	600	900	1200
N.º de subportadoras en banda de guarda	52	105	211	423	635	847
Ancho de banda útil (MHz)	1,140	2,265	4,515	9,015	13,515	18,015

Tabla 1.1: Parámetros principales según el ancho de banda del sistema en LTE.

1.1.1.2. Modulaciones

Hemos comentado que LTE usa una modulación OFDM para realizar la transmisión, por lo que nos queda ver cómo se modulan los datos que se transmiten en los símbolos OFDM. Los canales destinados a control y las señales de referencia tienen cada uno modulaciones fijas. Para el canal de datos, se permiten modulaciones de la familia PSK (*Phase-Shift Keying*) y QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), concretamente: QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM y 1024-QAM. Inicialmente, las modulaciones permitidas eran QPSK, 16-QAM y 64-QAM. A partir de la *release 10*, con el desarrollo de LTE-Advanced, se introducen nuevas modulaciones para aumentar las tasas de transmisión y poder llegar, como se ha apuntado, a las tasas exigidas en 4G. Para

este propósito, en la *release 12* se introdujo 256-QAM y, en la *release 15*, 1024-QAM, orientadas principalmente a la cobertura de microcélulas y picocélulas.

1.1.1.3. Generación de la señal

Vamos ahora a ver cómo se genera la señal LTE. La formulación matemática no es más que una adaptación de la de OFDM básica para incluir en ella los parámetros típicos de LTE y en la que se elimina la portadora central. Matemáticamente, la generación de la señal en tiempo para el puerto de antena p y el símbolo l sería como sigue [10, pp. 147-148]:

$$s_l^p(t) = \sum_{k=-\lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor}^{-1} a_{k^{(-)},l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP,l} T_s)} + \sum_{k=1}^{\lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor} a_{k^{(+)},l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP,l} T_s)} \quad (1.1)$$

$$k^{(-)} = k + \lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor \quad (1.2)$$

$$k^{(+)} = k + \lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor - 1 \quad (1.3)$$

donde $s_l^{(p)}(t)$ es la señal en tiempo en el puerto de la antena p para el símbolo l , $a_{k^{(-)},l}^{(p)}$ es el contenido del elemento (k, l) para el puerto p , N_{sc}^{RB} es el tamaño de un RB, expresado como número de subportadoras, N_{RB}^{DL} es la configuración de ancho de banda, expresada en términos de N_{sc}^{RB} , T_s es el tiempo de símbolo, $N_{CP,l}$ es la longitud del prefijo cíclico para el símbolo l y Δf es la separación entre subportadoras (15 kHz).

Como ocurre usualmente con los transmisores OFDM, la modulación no la vamos a implementar siguiendo la definición matemática descrita, si no que la realizaremos, de una manera más eficiente, utilizando una *Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)*, adaptando la estructura del transmisor a este caso particular como se indica a continuación:

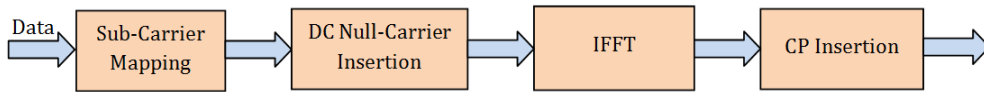


Figura 1.3: Diagrama de bloques básico de un modulador OFDM para señales LTE

1.1.2. Canales y señales físicas

Toda la información que se transmite se divide, a nivel físico, en distintos canales, que luego se mapean con los de un nivel superior: los canales lógicos. Por otra parte, se utilizan señales físicas para tener referencias sobre el canal de transmisión [11].

1.1.2.1. Canales físicos

Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)

Este canal físico es el encargado de transportar la información de usuario y control, salvo la multicast. A través de él se transmiten flujos de datos de usuario unicast y respuestas a peticiones realizadas en el canal de acceso aleatorio, entre otros. No es un canal dedicado, se asigna al usuario cuando éste tiene algo que recibir y como resultado de la gestión de recursos que realiza el *scheduler* de dicho enlace. Los esquemas de modulación soportados son QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM y 1024-QAM.

Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

Cada canal PDCCH transporta mensajes denominados *Downlink Control Information (DCI)*, formados por la agregación de *Control Channel Elements (CCE)*, estos incluyen información sobre la asignación de recursos. Además, lleva información sobre la localización de las respuestas de acceso a la red, sobre los mecanismos de retransmisión y sobre los comandos de control de potencia del enlace ascendente. En la transmisión se usa modulación QPSK.

Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel (PHICH)

Transporta los reconocimientos (ACK/NACK) que implementan el mecanismo HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) del enlace ascendente. Para reducir el *overhead*, se multiplexan de forma conjunta los ACK/NACK de distintos *User Equipment (UE)*. La multiplexación se realiza en código, utilizando secuencias de Walsh [12].

Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)

Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos utilizados para transmitir el canal PDCCH utilizando un indicador denominado *Channel Format Indicator (CFI)*. Debe tener la máxima cobertura posible y poder ser decodificado por todos los UEs. Para ello, transmite una modulación fija, QPSK, y con redundancia.

Physical Multicast Channel (PMCH)

El PMCH lleva el canal de transporte MCH y puede utilizar modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM, con turbocódigos de tasa 1/3. Este canal se usa para transmitir broadcast multimedia y servicios multicast (MBMS).

Physical Broadcast Channel (PBCH)

Este canal se transmite en los símbolos 0, 1 y 2 del slot 1 de cada subtrama y transporta la información de radiodifusión básica de la red, que permite la conexión inicial de un terminal móvil a la misma. Se modula usando QPSK.

1.1.2.2. Señales de referencia

No todos los RE pueden utilizarse para enviar información de control o datos de usuario. Algunos de ellos se utilizan para transmitir unas señales de referencia con valores predefinidos, de manera que se facilite la sincronización del terminal con el sistema, la demodulación coherente de los símbolos recibidos, ecualización y medidas de calidad del canal, etc. Por tanto, se reduce una parte de los recursos disponibles para poder llevar a cabo estos procedimientos. Esto, sin embargo, no necesariamente implica reducir la capacidad del enlace ya que, mediante procesado, permiten mejorar la calidad del mismo, compensando o incluso aumentando la capacidad. Las señales físicas definidas en el *downlink* son las siguientes:

- **Cell specific DL Reference Signals (CRS).** Son los símbolos piloto, se envían en cada subtrama y en cada PRB, distribuidas a lo largo de todo el ancho de banda del DL. Se utilizan para estimación de canal, medidas de calidad o sincronización.
- **Demodulation Reference Signals (DM-RS).** Son específicas para cada UE y se utilizan cuando se emplea *beamforming*. Esta técnica se utiliza en transmisiones MIMO para poder variar el enfoque del haz dinámicamente y fue introducida en LTE a partir de la *release* 8. Decir que, aunque las transmisiones MIMO no van a ser objetivo de este proyecto, serían fácilmente integrables porque la mayoría de funciones utilizadas lo permiten.
- **MBSFN reference signals.** Sirven para facilitar la demodulación coherente de los canales multicast/broadcast.
- **Positioning Reference Signals (PRS).** Se utilizan para servicios de posicionamiento, permitiendo que el UE efectúe medidas desde varias celdas para estimar la posición geográfica del terminal.

- **CSI Reference Signals.** Introducidas en la *release 10*, correspondiente a LTE-Advanced. Son usadas por el UE para adquirir información sobre el estado del canal, *Channel State Information (CSI)*, en el *downlink*.

Todas estas señales serán usadas implícitamente en el proceso de demodulación en receptor, para llevar a cabo las estimaciones y sincronizaciones pertinentes.

1.1.3. Estructura de la transmisión

En el apartado 1.1.1.1 hemos introducido las unidades básicas de asignación de recursos. Vamos ahora a profundizar un poco más en la estructura de transmisión. Esta responde a un modelo jerárquico: La estructura de mayor nivel se denomina trama y tiene una duración de 10 ms, esta determina la periodicidad del envío de los parámetros del sistema. Cada trama se divide en 10 unidades más pequeñas, denominadas subtramas (1 ms) que determinan la periodicidad, en FDD, del *scheduling* temporal y frecuencial.

La estructura que sigue la transmisión depende del modo de duplexado, que puede ser en frecuencia (FDD) o en tiempo (TDD). En este trabajo vamos a centrarnos especialmente en FDD, que es el que nos permite controlar la reconfiguración en frecuencia.

1.1.3.1. Duplexado FDD

Cada una de las subtramas consta de dos slots de 0,5 ms, los cuales contienen, a su vez, 6 o 7 símbolos OFDM cada uno, según el prefijo cíclico utilizado sea largo o corto, respectivamente. Por tanto, desde el punto de vista temporal, tenemos una estructura como se detalla en la figura 1.4 [9, p.76].

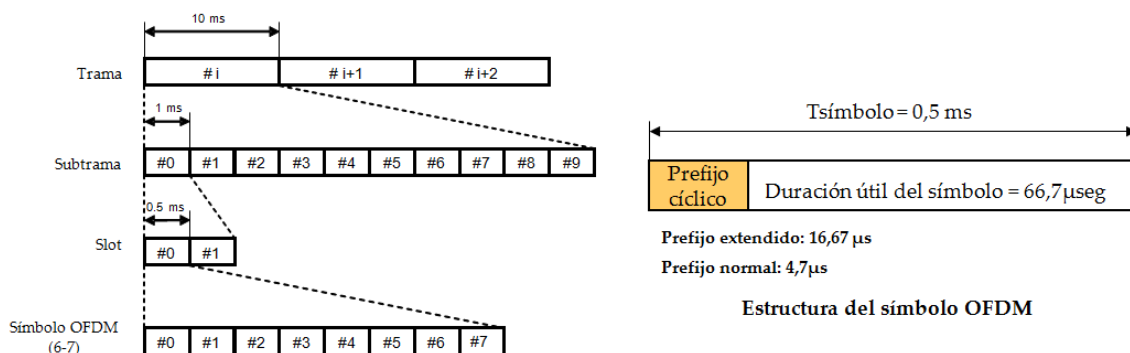


Figura 1.4: Estructura jerárquica de distribución de recursos radio en sistemas LTE.

Como se puede ver, hay dos tipos de prefijo cíclico (normal y extendido), esto es necesario para adaptarse a entornos con un canal radio multicamino con gran

dispersión temporal. Por otra parte, tenemos que la estructura en frecuencia viene determinada por el número de RB del sistema, N_{RB} , y el número de subportadoras por RB, N_{sc}^{RB} , que en este caso va a ser siempre 12. Así, la estructura básica queda como se puede ver en la figura 1.5.

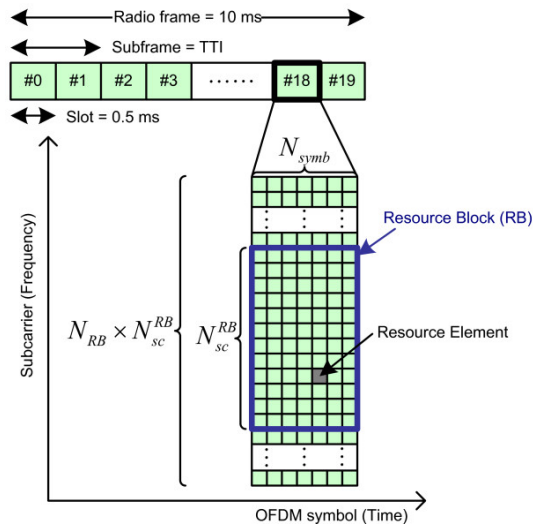


Figura 1.5: Estructura básica de distribución de recursos radio en el dominio frecuencial para un sistema LTE.

1.1.3.2. Duplexado TDD

En este modo, la estructura de trama cambia. Es necesario incorporar un cierto tiempo de guarda para las conmutaciones entre transmisión y recepción, tanto por parte del móvil como de la estación base. Para ello, se definen subtramas especiales (subtramas 1 y 6), las restantes pueden usarse para UL o DL, salvo las subtramas 0 y 5 que se usan para *downlink* y la 2 para *uplink*. Además, dicho tiempo de guarda tiene que ser suficiente para evitar interferencias debido a retardos de propagación elevados. En este caso, la estructura temporal tendría un aspecto como el siguiente [9, p.79]:

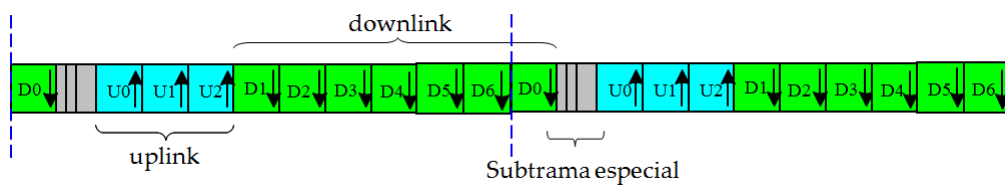


Figura 1.6: Estructura básica de tramas en el dominio temporal para duplexado en tiempo en un sistema LTE.

1.2. Nuevos esquemas de transmisión: 5G-NR

En este apartado vamos a comentar los fundamentos de las tecnologías 5G-NR. Como se trata de una evolución de lo contado en el punto anterior, vamos a exponer, partiendo de LTE, las modificaciones que se introducen a nivel físico y lo que nos permiten. Fundamentalmente, muchas de las nuevas características buscan dotar de una mayor configurabilidad y versatilidad a la red para afrontar con garantías las nuevas necesidades de comunicación. Por lo tanto, aunque aparecen funcionalidades realmente novedosas, podríamos decir, *grosso modo*, que LTE es un caso particular de 5G, especialmente en lo que respecta al nivel físico.

1.2.1. Rangos de frecuencia

Uno de los objetivos de 5G es poder aumentar el número de dispositivos conectados y, para ello, es necesario definir nuevos rangos de frecuencia y anchos de banda. El 3GPP define dos rangos de frecuencia en los que puede funcionar 5G; uno en la banda sub-6GHz, llamado FR1 (*Frequency Range 1*), y otro en la banda de ondas milimétricas, FR2 (*Frequency Range 2*). Las localizaciones exactas de estas bandas se detallan a continuación.

Designación	Rango de frecuencias
FR1	450 MHz - 6000 MHz
FR2	24250 MHz - 52600 MHz

Tabla 1.2: Rangos de frecuencia definidos para 5G-NR.

Dentro de ambos rangos de frecuencia, FR1 y FR2, se definen una serie de bandas de operación, cada una con un determinado ancho de banda máximo y un modo de duplexado a utilizar. Estas pueden consultarse en [14, pp. 16-19] y [15, pp. 14-16] para los rangos de frecuencia FR1 y FR2, respectivamente.

1.2.2. Modulaciones

En este aspecto, las novedades que aparecen en el *downlink* son mínimas. Se mantiene la modulación CP-OFDM (OFDM con prefijo cíclico) de LTE, aunque esta se introduce también en el *uplink*. Por otra parte, se permiten modulaciones para los RE de la familia PSK y QAM: $\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, y 256-QAM. Destaca, en este caso, la modulación $\pi/2$ -BPSK, introducida en la *release* 15, para soportar transmisiones con baja PAPR (*Peak-to-Average-Power Ratio*) [16].

1.2.3. Numerologías y anchos de banda

Aquí entra una de las grandes novedades de 5G-NR, que es la flexibilidad que presenta a la hora de gestionar los anchos de banda. Por un lado, conserva los conceptos de RE y PRB tal y como los hemos descrito en LTE, pero introduce varios conceptos nuevos.

Lo primero, es que permite diferentes numerologías, es decir, diferente *Subcarrier Spacing (SCS)*. Mientras que LTE sólo permitía $\Delta f = 15$ kHz, en 5G se define el espaciado entre subportadoras de la siguiente manera:

$$SCS = 2^\mu \cdot 15kHz, \text{ con } \mu = 0, 1, 2, 3 \quad (1.4)$$

Al final de este apartado detallaremos cuándo es posible usar cada valor de μ . A raíz de la existencia de diferentes numerologías, surge también el concepto de *Bandwidth Part*. Los BWPs proporcionan flexibilidad a la hora de transmitir debido a que permiten enviar señales de diferentes tipos en un ancho de banda, es decir, se pueden transmitir diferentes numerologías o señales con diferentes propósitos, cada una en un BWP configurado a tal efecto. Esto permitirá también la coexistencia de los sistemas 5G con los terminales LTE. Es importante señalar que sólo un BWP puede estar activo a la vez.

Como hemos apuntado, no es posible usar todas las numerologías para todos los anchos de banda. En función del FR, se definen los anchos de banda y numerologías permitidos, los cuales se recogen en las tablas 1.3 para FR1 y 1.4 para FR2 [16] [17].

BW (MHz)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	90	100
$\mu = 0$	25	52	79	106	133	160	216	270	–	–	–	–
$\mu = 1$	11	24	38	51	65	78	106	133	162	217	245	273
$\mu = 2$	–	11	18	24	31	38	51	65	79	107	121	135

Tabla 1.3: Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR1. Se especifica para ellas el número de RB.

1.2.4. Generación de la señal

La generación de la señal correspondiente para 5G-NR es similar a la de LTE, pues ambas se basan, como hemos comentado, en la modulación OFDM. Apartando

BW (MHz)	50	100	200	400
$\mu = 2$	66	132	264	–
$\mu = 3$	32	66	132	264

Tabla 1.4: Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR2. Se especifica para ellas el número de RB.

las diferencias debidas a las más numerosas configuraciones que permite 5G, la principal diferencia entre ellas es que en LTE la portadora de DC ($k=0$) no se utilizaba, mientras que en 5G sí. El modelo matemático para realizar la modulación quedaría, en este caso, como sigue [18, pp. 18-19]:

$$s_l^{(p,\mu)}(t) = \sum_{k=0}^{N_{grid,x}^{size,\mu} N_{sc}^{RB} - 1} a_{k,l}^{(p,\mu)} \cdot e^{j2\pi(k+k_0^\mu - N_{grid,x}^{size,\mu} N_{sc}^{RB} / 2) \Delta f (t - N_{CP,l}^\mu T_c - t_{start,l}^\mu)} \quad (1.5)$$

$$k_0^\mu = (N_{grid,x}^{start,\mu} + N_{grid,x}^{size,\mu} / 2) N_{sc}^{RB} - (N_{grid,x}^{start,\mu_0} + N_{grid,x}^{size,\mu_0} / 2) N_{sc}^{RB} 2^{\mu_0 - \mu} \quad (1.6)$$

donde $s_l^{(p,\mu)}(t)$ es la señal en tiempo en el puerto p para el símbolo l y numerología μ , $a_{k,l}^{(p,\mu)}$ es el contenido del elemento (k, l) para el puerto p y numerología μ , μ_0 es la mayor μ entre los posibles para la configuración usada, Δf es la SCS, N_{sc}^{RB} es el número de subportadoras por bloque de recursos, $N_{CP,l}^\mu$ es la longitud del prefijo cíclico, $N_{grid,x}^{start,\mu}$ es la posición de comienzo de la matriz de recursos y T_c la unidad de tiempo básica para señales 5G-NR .

La generación de la señal 5G-NR, como ocurre con todas las basadas en modulaciones OFDM, se puede implementar eficientemente utilizando la IFFT. La estructura de generación sería la indicada en la figura 1.7.

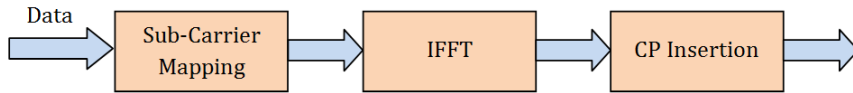


Figura 1.7: Diagrama de bloques básico de un modulador OFDM para señales 5G-NR

1.2.5. Canales y señales de la capa física

En cuanto a canales y señales físicas transmitidos, aparece una estructura bastante similar a LTE, pero con ligeros cambios que hay que tener en cuenta:

- En 5G-NR no hay señales CRS.
- Se introducen las señales PTRS para *tracking* de tiempo y frecuencia, cuyos desajustes introducen errores de fase.
- Se incluyen DM-RS tanto para uplink como para downlink. Recordar que, en LTE, los DM-RS se introdujeron en *releases* de LTE-A para el uso de *beamforming*.
- En LTE las señales de referencia se transmiten siempre para mantenimiento del enlace, en 5G-NR, se transmiten solamente cuando es necesario.
- Desaparecen los canales PHICH y PCFICH.

Dicho esto, los canales de nivel físico que nos quedan para 5G-NR son:

- **Physical Broadcast Channel (PBCH)**. Proporciona a los UEs el *Master Information Block (MIB)*, que contiene los parámetros esenciales para poder realizar la transmisión.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH)**. Transporta la información de control del *downlink*. Su principal función es la planificación de los recursos en las transmisiones del PDSCH.
- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)**. Es el encargado de transmitir la información de usuario.

De igual modo, las señales físicas son las siguientes:

- **Primary and Secondary Synchronisation Signals (PSS, SSS)**. Se utilizan para sincronización a nivel de las tramas radio.
- **Demodulation Reference Signals (DM-RS)**. Tenemos señales DM-RS tanto para el canal PDSCH como para el PBCH. Estas señales funcionan como señales referencia (pilotos) para la decodificación de ambos canales. En 5G, los DM-RS son muy importantes, ya que las CRS que teníamos en LTE desaparecen.
- **Phase Tracking Reference Signal (PT-RS)**. Nueva respecto a LTE. Se utiliza para compensar el ruido introducido en las fases.
- **Channel State Information Reference Signal (CSI-RS)**. Es usado por el UE para estimar el canal radio y reportar información de su calidad a la estación base.

1.3. NB-IoT

Narrowband Internet of Things (NB-IoT) es un estándar para transmisión radio desarrollado por el 3GPP orientado a soportar comunicaciones M2M (*Machine to Machine*). Los objetivos de esta tecnología buscan el bajo coste y complejidad para facilitar conexiones masivas. Además, se pretende que los dispositivos que la usen tengan requerimientos más relajados en lo que respecta a memoria de almacenamiento, elementos de procesado, componentes de RF y energía. El estándar NB-IoT nace condicionado por la arquitectura LTE, por lo que su diseño se orienta a asegurar su coexistencia con dicha tecnología, sin la necesidad de introducir modificaciones adicionales.

Para estos propósitos, el ancho de banda de los canales se ha establecido en 180 kHz, como vemos son señales de banda estrecha, y los requerimientos de sincronización tanto en tiempo como en frecuencia son bajos. Por otra parte, los esquemas de transmisión empleados también son más simples, se utilizan modulaciones BPSK y QPSK y transmisión con una antena (SISO) [19].

1.3.1. Generación de las señales NB-IoT

Como hemos apuntado, NB-IoT nace supeditado al estándar LTE, por lo que sigue su herencia en cuanto a numerologías y usa las modulaciones OFDM y SC-FDMA en *downlink* y *uplink*, respectivamente. Centrándonos en el *downlink*, la generación de la señal es similar a la de LTE, con la diferencia de que ahora no se elimina la portadora de DC, sino que se aplica un desplazamiento (*shift*) de media subportadora. La formulación matemática para la señal en tiempo en un determinado slot es la siguiente:

$$s_l^p(t) = \sum_{k=-\lfloor N_{sc}^{RB}/2 \rfloor}^{\lfloor N_{sc}^{RB}/2 \rfloor - 1} a_{k^{(-)},l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi(k+1/2)\Delta f(t-N_{CP,l}T_s)} \quad (1.7)$$

$$k^{(-)} = k + \lfloor N_{sc}^{RB}/2 \rfloor \quad (1.8)$$

donde $s_l^{(p)}(t)$ es la señal en tiempo en el puerto de la antena p para el símbolo l , $a_{k^{(-)},l}^{(p)}$ es el contenido del elemento (k, l) para el puerto p , N_{sc}^{RB} es el tamaño de un RB, expresado como número de subportadoras, T_s es el tiempo de símbolo, $N_{CP,l}$ es la longitud del prefijo cíclico para el símbolo l y Δf es la SCS (15 kHz).

Como con LTE y 5G-NR, la señal la modularemos usando la IFFT, en este caso:

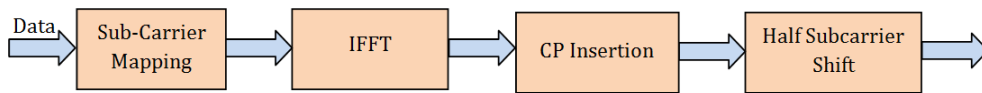


Figura 1.8: Diagrama de bloques básico de un modulador OFDM para señales NB-IoT.

1.3.2. Modos de funcionamiento

Las redes NB-IoT permiten tres modos de funcionamiento, ilustrados en la figura 1.9: *stand-alone*, en banda y en banda de guarda. Esto ha permitido su coexistencia con redes existentes, en concreto, con redes GSM y LTE [20, Figura 3-1].

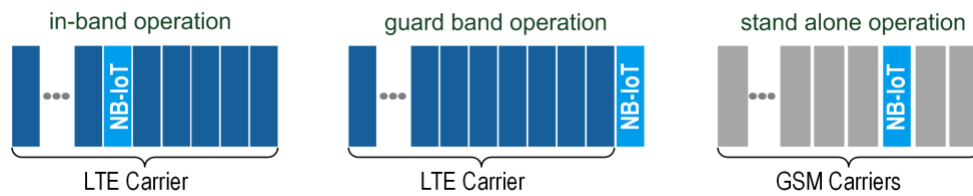


Figura 1.9: Modos de operación de un sistema NB-IoT: *stand-alone*, en banda y en banda de guarda.

1.3.2.1. Operación *stand alone*

Cuando se opera en este modo, existe una banda de frecuencia dedicada para la transmisión de las señales de NB-IoT. Uno de los escenarios se da cuando se usa la banda de GSM para transmitir este tipo de señales. En este caso, como los canales GSM tienen un ancho de banda de 200 kHz, queda una banda de guarda de 10 kHz a cada lado de la señal NB-IoT.

Como es de esperar, en este modo de operación se obtienen las mejores prestaciones, pero como la señal no aparece integrada con ninguna otra, no vamos a profundizar más en él en este trabajo.

1.3.2.2. Operación en banda

En este caso, las señales NB-IoT son transmitidas utilizando bloques de recursos libres dentro de la señal LTE. En este caso, la asignación de recursos para la señal NB-IoT no es fija como en el funcionamiento *stand-alone*, sin embargo, no todas las frecuencias y, por consiguiente, no todos los bloques de recursos dentro de la señal LTE pueden ser utilizados. Esto es así con el objetivo de evitar un conflicto en algunas frecuencias con los recursos utilizados por el sistema LTE para, por ejemplo,

la transmisión de señales de referencia (CRS) o del canal de control. Por tanto, los PRBs utilizables para la transmisión de señales NB-IoT están restringidos a los siguientes:

Ancho de banda del sistema LTE	Índices de los PRBs en los que se pueden introducir las señales NB-IoT
1,4 MHz	–
3 MHz	2, 12
5 MHz	2, 7, 17, 22
10 MHz	4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45
15 MHz	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 67, 72
20 MHz	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95

Tabla 1.5: PRBs utilizables en los sistemas LTE para transmisión de señales NB-IoT en banda.

Como se ve reflejado también en la tabla 1.5, no se da soporte a las transmisiones NB-IoT en los sistemas con un ancho de banda de 1,4 MHz

1.3.2.3. Operación en banda de guarda

En este modo de funcionamiento, el canal de NB-IoT se ubica en la banda de guarda de la señal LTE. Esta banda de guarda se compone de una serie de portadoras no utilizadas para mejorar el cumplimiento de los requerimientos de ACLR. La introducción de canales de NB-IoT afectará a este hecho, por lo que su estudio será uno de los objetos desarrollados en este trabajo. En la tabla 1.6 se recogen el número de canales que sería posible transmitir en cada banda de guarda para cada uno de los anchos de banda configurables en LTE.

Ancho de banda del sistema LTE (MHz)	Máximo número de canales que se pueden transmitir en la banda de guarda.
1,4	0
3	0
5	1
10	2
15	3
20	5

Tabla 1.6: Número máximo de canales NB-IoT que se pueden transmitir en la banda de guarda de la señal LTE

1.3.2.4. Funcionamiento multiportadora

Dentro de los modos de funcionamiento descritos anteriormente la información de IoT puede ser transportada usando una o varias portadoras. En el caso en el que se opere en modo multiportadora, una subportadora específica se configura para el establecimiento de la conexión y transferencia de datos y, el resto, sólo para transferencia de datos. La portadora utilizada para la configuración inicial de la conexión se denomina *Anchor* y el resto *Non-Anchor*.

1.3.3. Canales y señales de la capa física

Vamos ahora a comentar, sin entrar en mayor detalle, cuáles son y cuál es el objetivo de los diferentes canales, a nivel físico, que se transmiten en las señales NB-IoT. En el *downlink*, que es el enlace sobre el que versan los estudios realizados, hay tres canales físicos diferentes y dos señales físicas. Son los siguientes:

- **NPBCH:** *Narrowband Physical Broadcast Channel*, es un canal destinado al transporte exclusivamente del *Master Information Block (MIB)*. Utiliza modulación QPSK.
- **NPDCCH:** *Narrowband Physical Downlink Control Channel*, lleva información de control.
- **NPDSCH:** *Narrowband Physical Downlink Shared Channel*, lleva la información de usuario que se desea transmitir.
- **NRS:** *Narrowband Reference Signal*, son los pilotos que sirven para llevar a cabo la ecualización.
- **NPSS and NSSS:** *Narrowband Primary and Secondary Synchronization Signals*, son utilizadas para la estimación de offsets de tiempo y frecuencia, así como para la obtención de algunos parámetros.

En este caso, a diferencia de LTE, no se define el canal multicast PMCH, ya que no se contemplan servicios *Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)* para NB-IoT. A partir de la *release 14*, [21], las prestaciones se extienden también a estos servicios.

1.3.4. Estructuras de trama

En el *downlink*, como hemos comentado y debido al condicionamiento de LTE, se aplica una modulación OFDM usando una separación de 15 kHz entre subportadoras

y un prefijo cíclico (CP) normal (no se permite CP extendido), de modo que cada símbolo OFDM consiste en 12 subportadoras que ocupan un ancho de banda de 180 kHz, 7 símbolos consecutivos forman un slot. Así, un slot tendría el siguiente *grid* [20, Figura 3-3]:

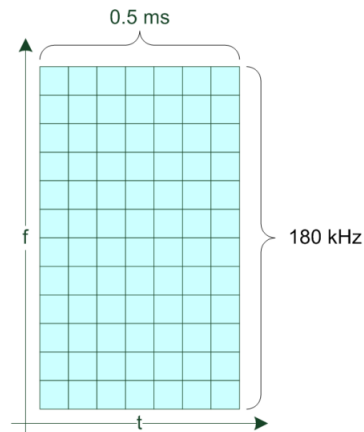


Figura 1.10: Matriz de recursos de un slot en un canal de NB-IoT.

Vemos que esta estructura es la misma que en LTE para un CP normal, lo que es indispensable para operación en banda. Dos de estos slots, forman una subtrama, y 10 de estas subtramas, una trama. Adicionalmente, se define el concepto de hipertrama, de 1024 periodos de trama, para llevar control sobre otros aspectos.

Sin embargo, hay aspectos novedosos en la estructura de transmisión con respecto a LTE, además de los anchos de banda y otros parámetros ya comentados. En LTE, la estructura en cuanto a contenido de cada trama era la misma, sin embargo, en NB-IoT no va a ser así, y se distingue entre las tramas pares e impares. Sin entrar en pormenores debidos a la diferencia entre operación en banda y en banda de guarda, el canal NSSS sólomente se transmite en las tramas pares, mientras que el NPSS se transmite en todas las tramas como se puede ver en la figura 1.11. Recordando lo que ocurría en LTE, ambos se transmitían en todas las tramas.

Even Frame	Subframe 0	Subframe 1	Subframe 2	Subframe 3	Subframe 4
	NPBCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH
	Subframe 5	Subframe 6	Subframe 7	Subframe 8	Subframe 9
	NPSS	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH
Odd Frame	Subframe 0	Subframe 1	Subframe 2	Subframe 3	Subframe 4
	NPBCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH
	Subframe 5	Subframe 6	Subframe 7	Subframe 8	Subframe 9
	NPSS	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NPDCCH/NPDSCH	NSSS

Figura 1.11: Estructura de trama en los sistemas NB-IoT. Se resalta la diferencia entre tramas pares e impares.

Teniendo en cuenta esto, la estructura de las tramas NB-IoT las podemos esquematizar según la siguiente figura, donde RF se refiere a *Radio Frame* y, SF, a *Subframe* [20, Figura 3-4]:

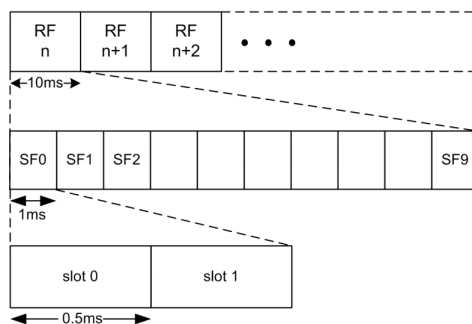


Figura 1.12: Estructura de organización de las tramas en sistemas NB-IoT.

Capítulo 2

Implementación del simulador

A lo largo del capítulo 1, hemos sentado las bases teóricas de los estándares de comunicaciones móviles sobre los que se fundamenta lo desarrollado en el presente TFG. Vamos ahora a ver cómo implementamos el simulador, de manera que nos permita reproducir transmisiones con una total reconfigurabilidad de la señal y que modele los efectos que se producen en los sistemas reales. Estos efectos degradantes que es necesario tener en cuenta son los correspondientes a elementos no lineales como el amplificador de potencia o la fibra óptica o los correspondientes al canal de transmisión. Por otra parte, definiremos las medidas que se ofrecerán tras las simulaciones y que utilizaremos para evaluar los resultados de las mismas y obtener conclusiones. Como hemos adelantado en el capítulo anterior, en el simulador se implementa solamente el *downlink*, ya que es el enlace donde tienen sentido los escenarios y pruebas que se proponen.

Para ampliar la información del presente capítulo sobre la aplicación, más a nivel descriptivo, acerca de significado de los campos, representaciones, etc. consultar las guías de usuario, recogidas en el anexo A.

2.1. Diagrama de bloques

Antes de entrar en detalle acerca de qué se incluye en el simulador y cómo se implementa, conviene situarse y tener una imagen global del mismo. En la figura 2.1, se puede ver un esquema sencillo de las partes de las que va a constar.

Como se puede apreciar, tendremos dos generadores, uno para la señal 5G y otro para las señales NB-IoT, ambos totalmente configurables por el usuario para modular las señales deseadas. Las salidas de ambos bloques se suman para generar la forma de onda que agrega las dos señales. Esta se hace pasar por el sistema

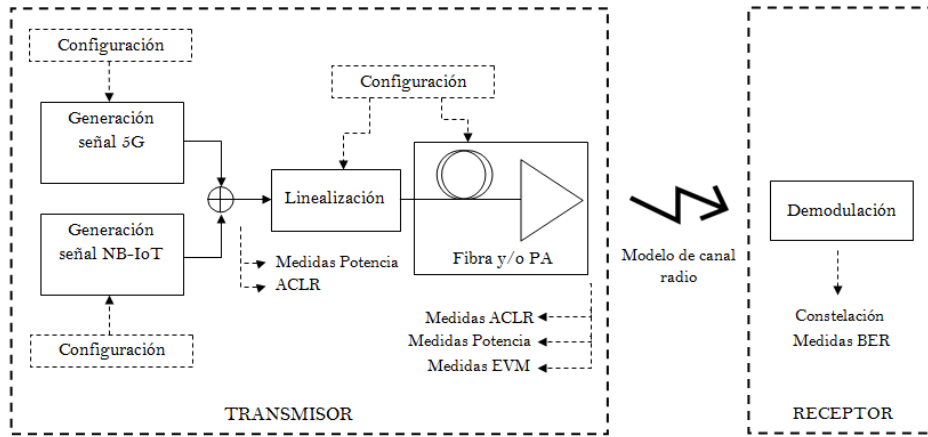


Figura 2.1: Diagrama de bloques del Simulador.

de linealización y el bloque que modela los elementos no lineales presentes, que veremos que podrá ser fibra y/o el amplificador de potencia. Destacar dos de las medidas que usaremos para evaluar al transmisor: el ACLR y el EVM, medidos a la salida del mismo. Tras él, se modelará el canal radio y se procederá a la demodulación de la señal en el receptor. Estos dos últimos, como se ha comentado, son bloques más básicos, con el objetivo principal de establecer su estructura de cara a implementaciones futuras.

Decir también que todos los procesados y simulaciones se realizan en banda base, es decir, usando el equivalente paso bajo de las señales.

2.2. Modelado del amplificador

En prácticamente cualquier transmisor vamos a tener elementos que van a introducir no linealidades, principalmente los amplificadores de potencia. Por tanto, si queremos que el simulador se aproxime lo máximo posible a la realidad es necesario modelar dichos efectos, que dependerán, además, del punto de operación en el que situemos al amplificador. Veremos también que el dispositivo tiene cierta memoria, por lo que la salida no dependerá únicamente de la señal de entrada en ese instante.

Por otra parte, debemos tener en cuenta que estamos usando modulación OFDM. Una de las principales desventajas que tiene es que presenta un elevado ratio de potencia pico a promedio (PAPR), lo que dificulta el trabajar eficientemente con amplificadores de potencia.

2.2.1. Modelo de amplificador sin memoria

Las no linealidades de un amplificador de potencia (PA) pueden estudiarse a partir de las conversiones amplitud a amplitud (AM/AM) y amplitud a fase (AM/PM). AM/AM hace referencia a los efectos de compresión que se producen para niveles altos de la señal de entrada y, AM/PM, al efecto de desplazamiento de fase en función del nivel de señal a la entrada del amplificador [22].

Existen numerosas técnicas de modelado de las citadas no linealidades sin tener en cuenta, de momento, la memoria. Algunos modelos, como el propuesto por Saleh en 1983, tienen en cuenta los dos tipos de conversiones. Otros, como el modelo de Rapp, asumen que la distorsión de fase va a ser muy pequeña, como normalmente ocurre, y la eliminan. En este trabajo, modelamos los efectos del amplificador usando uno de los modelos más conocidos, un modelo polinomial sin memoria (PM) [23, pp. 71-72]. Este no es más que una aproximación usando series de Taylor de orden K y tiene la ventaja de que no está restringido a un tipo concreto de amplificador. Se define de la siguiente forma:

$$y_{MP}(n) = \sum_{k=1}^N a_k x(n) |x(n)|^k \quad (2.1)$$

donde $x(n)$ es la señal de entrada, $y_{MP}(n)$ la señal de salida, N el orden de la no linealidad y a_k el vector de coeficientes complejos que modela el amplificador.

Implementación eficiente

A la hora de programar este tipo de modelos, que conllevan una notable carga computacional, es necesario buscar la máxima eficiencia y adaptarlos al entorno software en el que se está trabajando. En este caso, en MATLAB[®], es clave priorizar las operaciones matriciales, por lo que vamos a ver cómo quedaría el modelo en formato matricial. La ecuación 2.1 la podemos escribir de la siguiente forma:

$$\mathbf{y}_{MP} = \mathbf{X} \mathbf{a} \quad (2.2)$$

donde \mathbf{a} es el vector de coeficientes y \mathbf{X} la señal de entrada en formato matricial, definida como:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x(0)|x(0)| & \cdots & x(0)|x(0)|^N \\ x(1)|x(1)| & \cdots & x(1)|x(1)|^N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x(L)|x(L)| & \cdots & x(L)|x(L)|^N \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

donde $x(n)$ es la señal de entrada, de longitud L y N el orden de la no linealidad.

Ahora, nos falta calcular los coeficientes del modelo, \mathbf{a} . Existen diferentes aproximaciones para este cálculo; en este caso, como la dependencia de los coeficientes con la señal de entrada es lineal, podemos aplicar minimización por mínimos cuadrados y calcular los coeficientes mediante la pseudoinversa de la señal de entrada en formato matricial:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H \cdot \mathbf{y} \quad (2.4)$$

siendo $(\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H$ la pseudoinversa de la señal de entrada en formato matricial \mathbf{X} y $\hat{\mathbf{a}}$ el vector de coeficientes estimado. Una vez tenemos esto, podemos calcular la salida del sistema fácilmente como:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} \quad (2.5)$$

El error cometido en el modelado se define como: $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}$.

2.2.2. Modelo de amplificador con memoria

Como hemos introducido al inicio de esta sección, en los amplificadores aparece un cierto efecto de memoria. Este se acentúa especialmente en señales con anchos de banda grandes y, como en nuestro caso vamos a trabajar con señales de este tipo, se hace necesario el uso de modelos con memoria.

Generalmente, la forma de representar sistemas no lineales con memoria M es mediante las series de Volterra, que consisten en una suma de convoluciones multidimensionales. Sin embargo, la complejidad de este modelo es elevada, por lo que se recurre a modelos más simples obtenidos a partir del anterior. En nuestro caso, vamos a utilizar el modelo de Kim y Konstantinou, conocido como modelo polinomial con memoria (MPM) [23, pp. 73-76] y definido como sigue:

$$y_{MPM}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=1}^N a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^{k-1} \quad (2.6)$$

donde a_{km} es un array de dos dimensiones que contiene los coeficientes complejos de la series de potencias.

Implementación eficiente

Igual que para el caso de modelado sin memoria, el coste computacional para este

supuesto es alto, por lo que vamos a reescribirlo de forma que la eficiencia de la implementación sea mayor. La ecuación 2.6 se puede expresar de la siguiente forma:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{a} \quad (2.7)$$

donde \mathbf{X} es la señal de entrada del sistema en modo matricial, \mathbf{a} el vector de coeficientes e \mathbf{y} la señal de salida. \mathbf{X} tendrá la siguiente estructura:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \ \dots \ \mathbf{X}_k \ \dots \ \mathbf{X}_N] \quad (2.8)$$

con

$$\mathbf{X}_k = \begin{pmatrix} x_{k,1}(n) & \cdots & x_{k,M}(n) \\ x_{k,1}(n) & \cdots & x_{k,M}(n+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k,1}(n) & \cdots & x_{k,M}(n+L-1) \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

siendo L la longitud de la señal de entrada y $x_{k,m}$

$$\mathbf{x}_{k,m}(n) = x(n-m)|x(n-m)|^{k-1} \quad (2.10)$$

Ahora, nos queda calcular los coeficientes \mathbf{a} . Existen diferentes aproximaciones, en este caso, como la dependencia de los coeficientes con la señal de entrada es lineal, podemos aplicar minimización por mínimos cuadrados y calcularlos de manera análoga al caso sin memoria, calculando la pseudoinversa de la matriz \mathbf{X} .

2.2.3. Predistorsión digital

Para lograr la mayor eficiencia posible del amplificador de potencia, es necesario trabajar en zona no lineal, lo que hace que la señal sufra distorsión. Estos efectos los trataremos de mitigar usando linealización.

Existen múltiples técnicas de linealización; en este trabajo vamos a emplear la de predistorsión digital (DPD), debido a que permite trabajar con los anchos de banda de las señales LTE y 5G y tiene buenas características de coste y simplicidad. En el presente trabajo, vamos a utilizar una arquitectura de aprendizaje indirecto ILA (*Indirect Learning Architecture*), introducida en 1997 para la identificación de predistorsionadores digitales [24]. Su funcionamiento se basa en identificar los coeficientes del postdistorsionador a partir de las señales de entrada y salida del sistema no lineal $x(n)$ e $y(n)$, como se indica en la figura 2.2. Estos coeficientes los podemos replicar en el predistorsionador ya que, según [25], este es equivalente al postdistorsionador en un sistema de Volterra de orden N . El esquema que tendría el sistema DPD con aprendizaje indirecto sería el indicado en la figura 2.2.

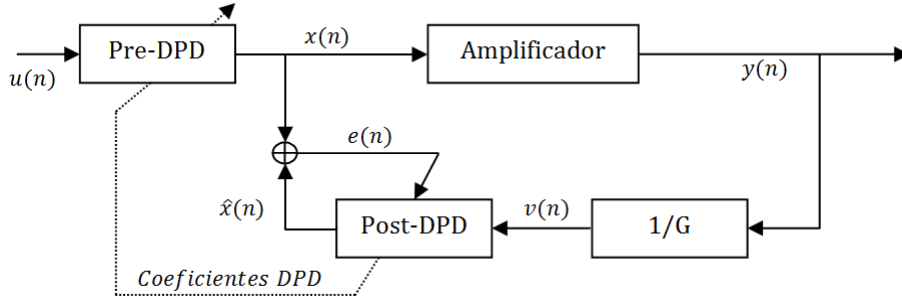


Figura 2.2: Esquema de un predistorsionador digital con aprendizaje indirecto.

2.2.3.1. Predistorsión del modelo sin memoria

Vamos ahora a calcular el predistorsionador digital del modelo sin memoria, siguiendo el análisis realizado en [23, pp. 93-97] para calcular el modelo pero teniendo en cuenta las señales que aparecen en la figura 2.2. Partiremos de la señal $v(n)$, definida como:

$$v(n) = \frac{y(n)}{G} \quad (2.11)$$

Siendo G la ganancia normalizada del amplificador, acerca de la cual hablaremos al final de este apartado. Si sustituimos $v(n)$ en la ecuación 2.1 tenemos:

$$x(n) = \sum_{k=1}^N w_k v(n) |v(n)|^k \quad (2.12)$$

donde K es el orden de no linealidad y w_k el vector de coeficientes. Si escribimos esta ecuación matricialmente como habíamos hecho para el modelado:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{w} \quad (2.13)$$

siendo \mathbf{V} la señal de entrada al postdistorsionador en formato matricial, \mathbf{w} el vector de coeficientes y \mathbf{x} la señal de salida. Los coeficientes estimados se pueden obtener de manera similar al caso del modelado:

$$\hat{\mathbf{w}} = (\mathbf{V}^H \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^H \mathbf{x} \quad (2.14)$$

donde $(\mathbf{V}^H \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^H$ representa la pseudoinversa de \mathbf{V} y $\hat{\mathbf{w}}$ el vector de coeficientes estimados. Por tanto, podemos calcular la salida como:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{w}} \quad (2.15)$$

El error cometido en la identificación del postdistorsionador será: $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$.

Vamos a volver ahora sobre la ganancia G , de la que hablábamos al principio

del apartado y un factor crítico. Se define como el factor de escalado para normalizar la señal de salida, $y(n)$, a la misma potencia que la señal de entrada al predistorsionador, $u(n)$, según se muestra en la figura 2.2. No vamos a entrar en detalle a estudiar los efectos de la G , puesto que no es objeto de este trabajo, pero cabe destacar que, aunque no influye en la eficiencia del PA, sí que afecta a la linealidad obtenida y a la potencia de salida. Como se puede ver en la figura 2.3, si tomamos $G = G_{max}$ aumentamos la pendiente de la curva AM/AM, provocando que muchas muestras de la señal de entrada entren en saturación, esto, a su vez, se traduce en distorsión. Por el contrario, si utilizamos $G = G_{min}$, vamos a limitar la potencia de salida, aunque tendremos una linealización muy buena. Así, la mejor solución será buscar un compromiso donde obtengamos buena linealidad sin limitar en exceso la potencia de salida.

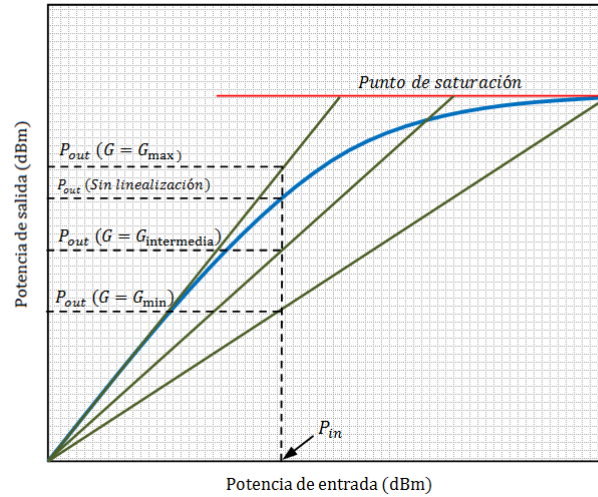


Figura 2.3: Curvas AM/AM sin linealización y con linealización para diversos valores del factor de ganancia G .

2.2.3.2. Predistorsión del modelo con memoria

Para hallar los coeficientes del predistorsionador digital del modelo con memoria procedemos igual que en apartado anterior. En este caso, partimos de la expresión 2.6. Ahora, la señal de entrada será $v(n)$, definida a partir de la figura 2.2 como:

$$v(n) = \frac{y(n)}{G} \quad (2.16)$$

Sustituyéndola en la ecuación 2.6:

$$x(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=1}^K w_{km} v(n-m) |v(n-m)|^k \quad (2.17)$$

donde K es el orden de la no linealidad, M la profundidad de memoria y w_{km} el vector bidimensional de coeficientes. Así, la salida del postdistorsionador la podemos escribir matricialmente, de manera similar a 2.3:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{w} \quad (2.18)$$

siendo \mathbf{V} la señal de entrada al postdistorsionador en formato matricial, \mathbf{w} la matriz de coeficientes y \mathbf{x} la señal de salida. A partir de esta expresión, ya podemos calcular los coeficientes calculando la pseudoinversa de la matriz V , igual que para el caso sin memoria.

2.3. Modelado de fibra óptica

El método expuesto en el apartado anterior es muy versátil y no sólo nos permite modelar amplificadores no lineales sino que, como se basa en medidas reales tomadas a la entrada y salida del sistema no lineal, se puede extender este tipo de modelado a otros elementos.

Uno de estos componentes no lineales es la fibra óptica, la cual también nos interesa poder modelar por formar parte de los nuevos esquemas de *Radio over Fiber (RoF)*. Estas tecnologías consisten en la transmisión a través de fibra de la luz modulada por la señal de radio, en este caso 5G. Se utilizan en las nuevas arquitecturas Cloud RAN [26], que centralizan las unidades de procesamiento en banda base donde se genera la señal (BBU), para luego distribuirla a todas las RRH (*Remote Radio Head*) por fibra óptica, donde se amplifica y emite a los usuarios. Las ventajas de estos sistemas abarcan todas las propias de las transmisiones por fibra óptica: bajas pérdidas, reducción de interferencia, etc. Sin embargo, aunque sean numerosas las ventajas obtenidas, también se producen efectos indeseados, especialmente en los sistemas actuales donde las potencias transmitidas son elevadas ($> 10mW$), que afectan especialmente cuando las tasas de transmisión son elevadas, como ocurre mayoritariamente. Los dos fenómenos no lineales básicos que aparecen en estos sistemas son [27, pp. 72-80]:

- **Scattering no lineal.** Aparece a causa de la difusión (pérdida) de potencia óptica al interactuar con el medio, pero se pierde con longitudes de onda diferentes de la originó dicha difusión.
- **Efecto Kerr.** Debido a la dependencia del índice de refracción con la potencia óptica que se propaga por la fibra.

Para tener en cuenta estos efectos, basta con incluir la fibra en el sistema real del que capturamos las señales a entrada y salida, tal y como se muestra en la figura 2.4. De esta forma, al realizar el modelado según el algoritmo expuesto en el apartado anterior incluimos todos los efectos que se hayan introducido.

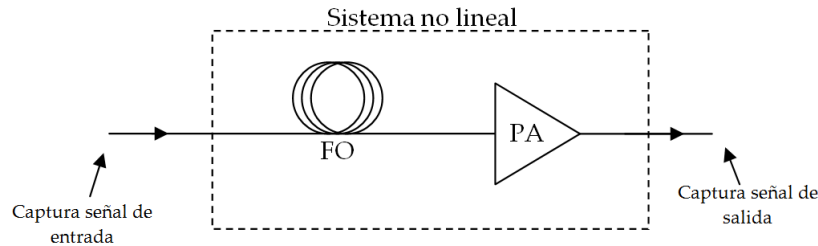


Figura 2.4: Captura de señales a entrada y salida de un sistema no lineal para su posterior modelado.

En este trabajo, se han utilizado capturas de señales de entrada y salida procedentes de medidas experimentales realizadas previamente en el laboratorio en sistemas con la fibra y el amplificador para, a partir de ellas, calcular el modelo de la no linealidad del transmisor. En el simulador, además, se incluyen una serie de parámetros configurables, como detallaremos en apartados siguientes, para tener en cuenta las condiciones en las que han sido medidas las señales con las que se va a realizar el modelado: impedancia de referencia, por defecto 50Ω , sobre la que se ha medido o posibles atenuadores para medir protegiendo a los equipos.

2.4. Modelado del canal

Una vez tenemos desarrollados los modelos de los elementos no lineales, nos quedan los efectos del canal de transmisión para poder simular escenarios reales. Como se ha apuntado, no vamos a hacer un modelado exhaustivo de esta parte, sino que simplemente vamos a dejar implementado el módulo básico para poder completarlo y realizar evaluaciones en un futuro.

Para modelar los canales de transmisión que se dan en diversas situaciones reales vamos a basarnos en los recogidos por los estándares del 3GPP para LTE-Advanced y para 5G, ya que permiten el modelado de todas las situaciones de interés. Vamos a exponer los fundamentos de estos tipos de canales, para conocer los parámetros concretos utilizados, el lector puede remitirse a [28, Anexo B] y [29, pp. 65-72] para

los de LTE-Advanced y 5G-NR, respectivamente.

Empezamos primero comentando los recogidos por el estándar de LTE-Advanced. Se describen tres canales para modelado de situaciones típicas en las que existe multicamino, basados en la función Rayleigh:

- **Modelo EPA.** El modelo *Extended Pedestrian A* modela condiciones de baja movilidad.
- **Modelo EVA.** El modelo *Extended Vehicular A* modela condiciones de movilidad media, típicas para comunicaciones desde vehículos.
- **Modelo ETU.** El modelo *Extended Typical Urban* modela condiciones de alta movilidad en entornos urbanos. Este es el más degradante debido al entorno representado y a la alta movilidad.

En los anteriores, los perfiles de retardo se mantienen constantes. En el estándar también se definen otros dos escenarios en los que dichos perfiles se modifican en el tiempo siguiendo una función senoidal. Estos son:

- **Modelo ETU-200.** Modelo que implementa un canal típico urbano con un desplazamiento Doppler de hasta 200 Hz, retardos variables siguiendo una función senoidal y modelo de desvanecimiento Rayleigh. Modela velocidades del UE de hasta 120 Km/h.
- **Modelo Moving-AWGN.** Modela un canal sin desvanecimiento pero que introduce retardos variables que se traducen en rotaciones de fase y con ruido AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) añadido. Permite modelar muy altas velocidades.

Estos canales pueden elegirse y configurarse en el simulador como se indica en la figura 2.5. Por otra parte, el estándar 5G-NR define otros dos tipos de canales con *fading*, adaptados a las condiciones de uso de 5G:

- **Modelos CDL.** Los modelos *Clustered Delay Line* se utilizan especialmente para simular entornos de propagación en transmisiones MIMO. Existen cinco modelos dentro de este grupo. Los modelos CDL-A, CDL-B y CDL-C, modelan condiciones *Non-line-of-sight (NLOS)*, mientras que los CDL-D y los CDL-E, simulan condiciones de *Line-of-sight (LOS)*.
- **Modelos TDL.** Los modelos *Tapped Delay Line* buscan representar canales con desvanecimiento usando la función de distribución Rayleigh. Dentro de

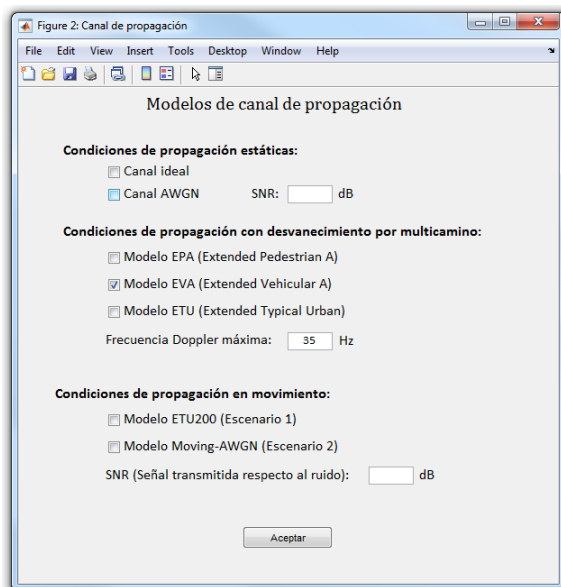


Figura 2.5: Ventana del simulador 5G–NB-IoT que permite configurar el canal de propagación.

este grupo, existen también cinco modelos. Los tres primeros TDL-A, TDL-B y TDL-C, se han diseñado para simular condiciones NLOS, mientras que los otros dos, TDL-D y TDL-E, hacen lo propio con condiciones LOS. En los modelos TDL-D y TDL-E, debido a las condiciones de visión directa, también se incluye modelado utilizando la distribución Rice.

Además de los descritos, en el simulador incluiremos un canal ideal y un canal AWGN con *Signal-to-noise ratio* (SNR) ajustable para modelar condiciones favorables y poder realizar otros estudios más teóricos.

2.5. Medidas de evaluación de resultados

Una vez tenemos concretado cómo vamos a tratar los diferentes elementos que aparecen en los sistemas reales y que era necesario tener en cuenta, pasamos a la presentación de los parámetros y medidas que vamos a utilizar para evaluar los resultados obtenidos en la simulación. Esta caracterización la vamos a hacer, principalmente, en términos de linealidad (ACLR) y de distorsión en banda (EVM). Por otra parte, como vamos a generar múltiples configuraciones de la señal, se hace necesaria una caracterización de las propiedades de esta para poder justificar efectos producidos o las condiciones en las que trabaja, por ejemplo, el amplificador de potencia. Las propiedades en el dominio frecuencial las podremos ver en las representaciones espectrales, mientras que las temporales las veremos mediante la

Peak to Average Power Ratio (PAPR). Por otra parte, en el caso en el que simulemos una transmisión completa, podemos evaluar su calidad mediante el *Bit Error Rate (BER)*.

2.5.1. PAPR

La *Peak to Average Power Ratio (PAPR)* es una relación entre la potencia de pico de la señal y su valor cuadrático medio RMS (*Root Mean Square*), por lo que nos da una idea del margen de trabajo que va a poder tener el amplificador. Se define, en dB, según la ecuación 2.19:

$$PAPR [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{|x_{peak}|^2}{x_{RMS}^2} \right) \quad (2.19)$$

Cuanto mayor sea esta PAPR más excursión dentro de la curva AM/AM tendrá la señal de entrada y, por lo tanto, más complicado será configurar el punto óptimo entre linealización y potencia de salida.

2.5.2. ACLR

El *Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR)* es un factor de mérito definido para evaluar recrecimientos espectrales al pasar por un sistema no lineal, además de un requerimiento a la hora de transmitir señales radio para que la interferencia con otros canales sea la menor posible. En nuestro caso, el mínimo ACLR requerido es de 45 dB. Matemáticamente, se define como:

$$ACLR_{ady_p} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{channel} |Y(f)|^2 df}{\int_{ady_p} |Y(f)|^2 df} \right), \quad p = 1, 2, 3, 4 \quad (2.20)$$

donde $Y(f)$ es la transformada de Fourier en de la señal de salida y p representa cada uno de los canales adyacentes. En las evaluaciones, vamos a tener en cuenta cuatro canales adyacentes, dos a cada lado del principal. Las posiciones de estos canales son $f_0 \pm p \cdot BW$, siendo f_0 la frecuencia central del canal principal, BW su ancho de banda y $p = \pm 1, \pm 2$.

2.5.3. EVM

Otra de las medidas que vamos a utilizar para evaluar la calidad y la degradación producida es el *Error Vector Magnitude (EVM)*. El EVM nos permite cuantificar el error que se produce en los símbolos enviados, debido a las no linealidades del

transmisor, respecto a los de la constelación ideal y se define:

$$EVM(n) [\%] = 10 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{I_{err}^2(n) + Q_{err}^2(n)}}{Average\ Symbol\ Power} \right) \times 100\% \quad (2.21)$$

donde n es el índice, N el número total de símbolos y $I_{err} + jQ_{err}$ el vector de error del símbolo enviado respecto al ideal. La siguiente figura 2.6 nos ilustra perfectamente este cálculo [30]:

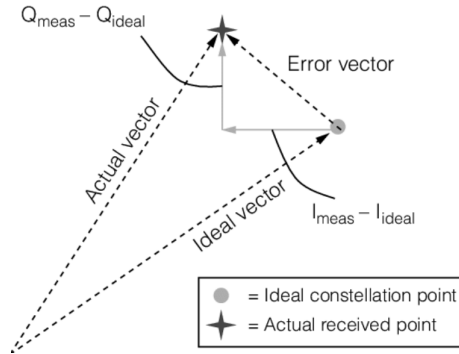


Figura 2.6: Ilustración de lo que representa el *Error Vector Magnitude* y de los parámetros que intervienen en su cálculo.

Como vemos, nos permite cuantificar los efectos que podemos ver cualitativamente en la constelación. Si con el ACLR evaluábamos la distorsión fuera de banda, el EVM nos da idea sobre la distorsión que se produce en banda.

2.5.4. BER

El *Bit Error Rate (BER)* es una medida de la fiabilidad de una comunicación, puesto que se define como el número de bits erróneos recibidos dividido entre el número total de bits transmitidos, como se indica a continuación:

$$BER = \frac{\text{Número de bits erróneos}}{\text{Número total de bits transmitidos}} \quad (2.22)$$

En nuestro caso, se medirán para el canal de datos (canal PDSCH).

2.6. Interfaz del simulador

Una vez hemos definido los aspectos más técnicos que fundamentan el simulador, tanto desde el punto de vista de estándares móviles como de los métodos de modelado y realización de medidas, vamos a hacer un breve repaso de las posibilidades que le da al usuario. La interfaz principal del simulador puede verse en la figura 2.7, donde

se aprecian las diferentes partes del mismo: transmisor, visualización de resultados en transmisión, modelado del canal, receptor y menús de ayuda y opciones.

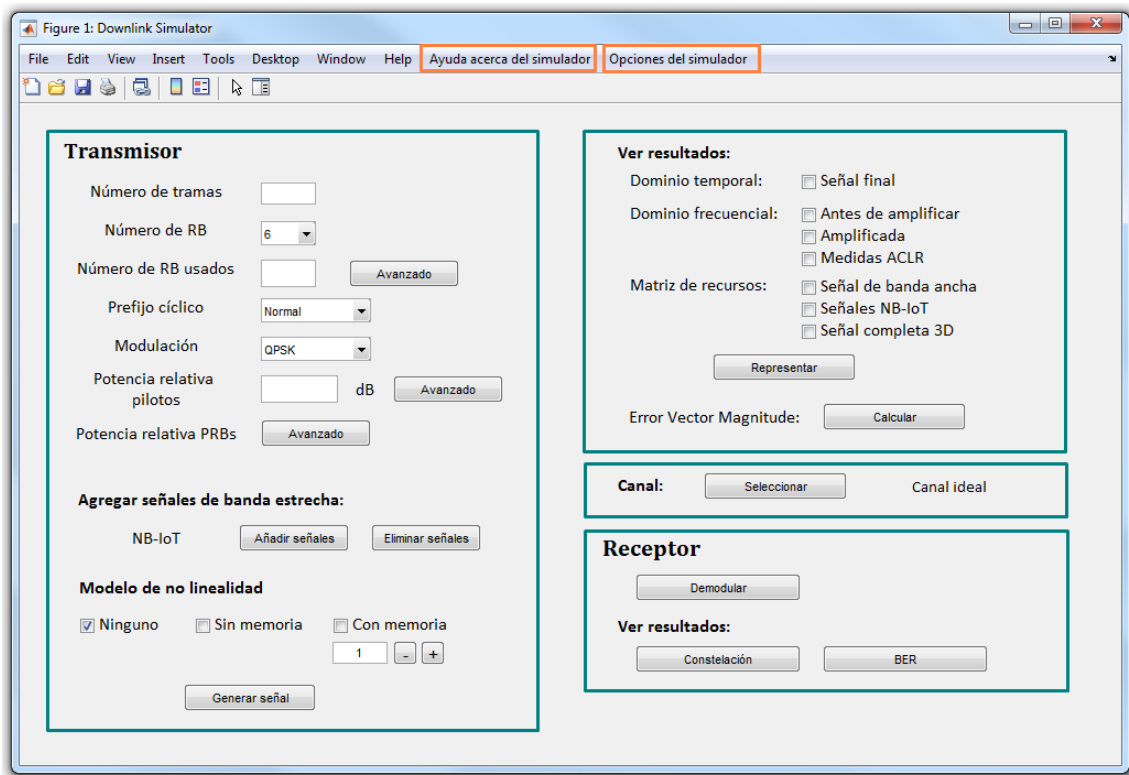


Figura 2.7: Interfaz de usuario del simulador 5G–NB-IoT.

2.6.1. Posibilidades de generación de la señal

Como ya hemos ido avanzando, nos vamos a centrar en maximizar el ajuste de los parámetros de la capa física, que es la que nos interesa estudiar. Para que la complejidad del simulador no aumente en exceso para el usuario y por temas de compatibilidad con las funciones disponibles en MATLAB[®] hasta la fecha, se ha dividido el simulador en dos partes. En la primera, la más importante y cuya interfaz se muestra en la figura anterior, se mantiene numerología $\mu = 0$ y se permite total integración con señales de banda estrecha y configurabilidad de parámetros; en la segunda, centramos el estudio simplemente en los efectos de las diferentes numerologías, con modelos de test concretos que ahora comentaremos.

En la primera parte, como hemos comentado, se mantendrá la numerología y se permitirá total reconfiguración, pudiéndose ajustar los siguientes parámetros, como se puede ver en la parte del transmisor de la figura 2.7:

- **Número de tramas.** Para determinar la longitud temporal de la señal en términos de tramas.
- **Número de RB.** Nos permite ajustar el ancho de banda del sistema en términos del número de RBs.
- **Número de RB usados.** Permite variar el número de RBs usados para transmitir, eligiendo cualquier configuración con una precisión del nivel de subtrama, es decir, al nivel del par PRB, que es la unidad mínima de asignación.
- **Prefijo cíclico.** Para variar entre prefijo cíclico normal o extendido.
- **Modulación.** Permite cambiar la modulación de los datos entre todas las permitidas en el estándar.
- **Potencia relativa de las señales piloto.** Podemos aumentar o disminuir la potencia de las señales piloto, con un nivel de resolución de subtrama.
- **Potencia relativa de los PRBs.** En este caso se permite variar la potencia relativa de los pares PRB usados.

En la segunda parte, se permiten simular las configuraciones *New Radio*, aún en fase de desarrollo. Para ello, se proponen una serie de modelos de test en cada uno de los rangos de frecuencias, recogidos en el estándar para la evaluación de prestaciones. Dichos modelos de test se explican con un mayor detalle en [31, pp. 44-94] para las frecuencias FR1 y en [32, pp. 50-53] para FR2. Permiten jugar con las modulaciones empleadas, los PRBs en los que se transmite y la potencia de estos. Además, se le permite al usuario configurar otros parámetros como son la numerología, el ancho de banda de la señal o el duplexado. La interfaz de este es muy similar y puede encontrarse en el anexo A.

De este modo, conseguimos cubrir las diferentes casuísticas de interés, manteniendo al máximo la simplicidad para el usuario.

2.6.2. Representaciones

Para poder visualizar los resultados, el usuario dispone de una variedad de representaciones que permiten controlar la forma de la señal en todo momento y desde diversos puntos de vista. Además, en ellas se incluyen también las medidas de evaluación de calidad de las que hemos hablado, de manera que el usuario puede tener una visión muy amplia de lo que se está simulando. Algunas de estas representaciones se comentan a continuación.

En la figura 2.8, se pueden ver los espectros de la señal antes y después de ser amplificada, con y sin linealización, apreciándose las mejoras que esta produce, el compromiso que existe, etc. Además, en la parte derecha se ofrecen medidas de potencia, ancho de banda o desajustes y se puede cambiar a una vista donde se muestra el ACLR y la posición de los canales adyacentes, como se puede ver en la figura 2.9.

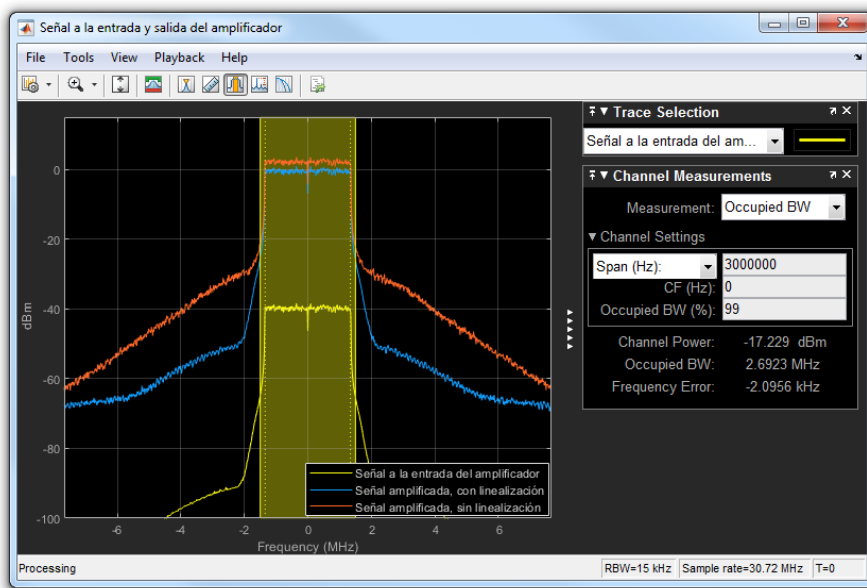


Figura 2.8: Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización.

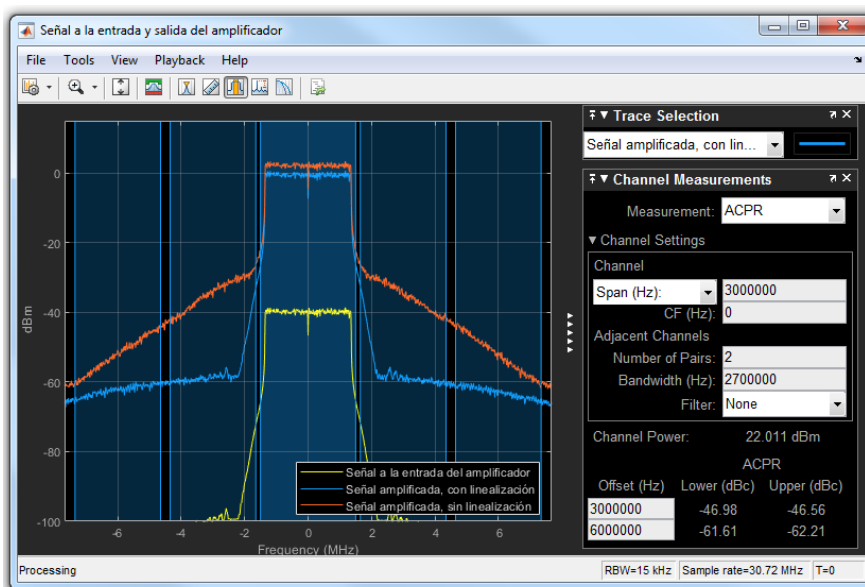


Figura 2.9: Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización. Se muestran los niveles de ACLR y la posición de los canales adyacentes para la señal amplificada y linealizada.

En la figura 2.10 se puede ver la densidad espectral de potencia normalizada de la señal que se transmite, con la posición de los canales adyacentes y el ACLR para cada uno de ellos.

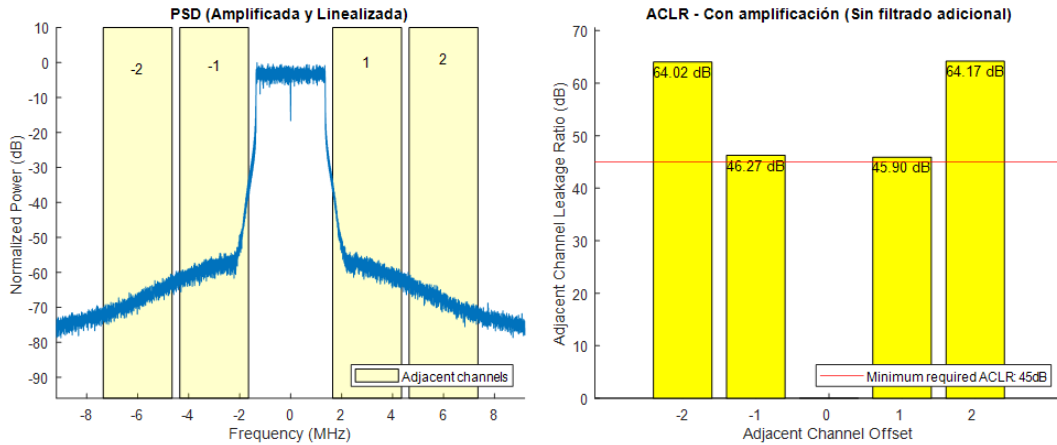


Figura 2.10: Densidad espectral de potencia normalizada de la señal transmitida (izquierda) y ACLR para cada uno de los canales adyacentes (derecha).

La representación de la figura 2.11 ofrece una visión tiempo-frecuencia de la señal agregada en 3D, de manera que se pueden ver las posiciones de las señales 5G e IoT, las diferencias de potencia entre PRB, portadoras desocupadas, etc.

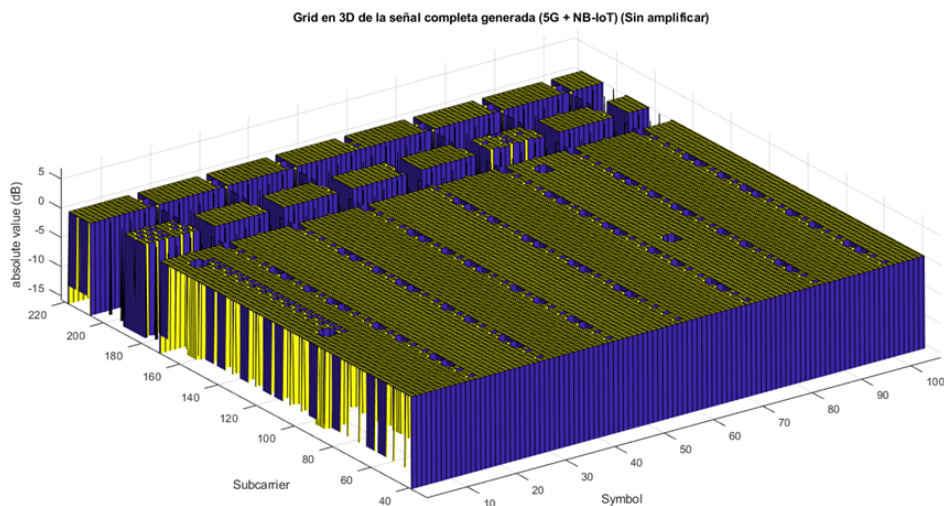


Figura 2.11: Representación en 3D de la señal generada, agregando señales 5G y NB-IoT, antes de pasar por el amplificador. Se muestra una señal 5G con un BW de 15 RB, usándose del 0 al 10 y el 14, con transmisión IoT en banda en el PRB 12.

Por otra parte, las gráficas de la figura 2.12 nos permiten ver las medidas de EVM en la señal que se transmitiría en función de las dimensiones tiempo y frecuencia, por subportadora y por RB.

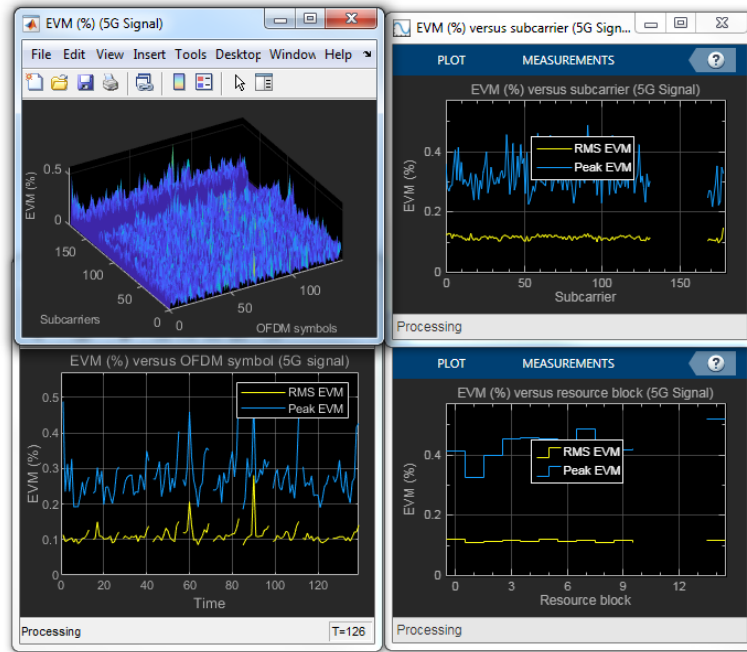


Figura 2.12: Representación del EVM en función de tiempo y frecuencia (arriba-izquierda), tiempo (abajo-izquierda), subportadora (arriba-derecha) y RB (abajo-derecha)

Por último, ya en la parte del receptor, otra representación típica e importante para ver de manera cualitativa la calidad de una transmisión es la constelación, que se puede visualizar tal y como aparece en la figura 2.13

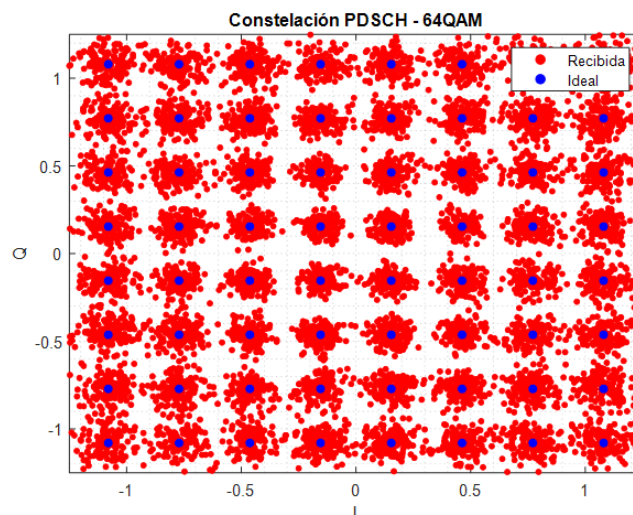


Figura 2.13: Representación la constelación recibida para una simulación con modulación 64-QAM.

2.6.3. Modelado de elementos no lineales

Como se ha mostrado en la figura 2.7, en el simulador tenemos un menú de ayuda y uno de opciones. En el primero se ofrecen al usuario las pautas básicas para el manejo del simulador y, en el segundo, aparecen tres submenús: ajustar señales de entrenamiento, modo de evaluación y exportar señales.

El submenú "Ajustar señales de entrenamiento" es el que nos permite elegir las señales reales que vamos a usar para modelar los elementos no lineales presentes: amplificador de potencia y/o fibra óptica. Tal y como se muestra en la figura 2.14, para ello se seleccionará el fichero en el que se encuentren guardadas las señales y se ajustarán los parámetros de las condiciones en las que se ha capturado la señal: impedancia de referencia y atenuación en las medidas.

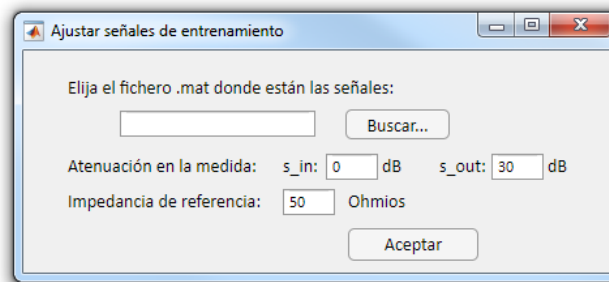


Figura 2.14: Ventana que permite seleccionar las señales usadas para el modelado de elementos no lineales.

2.6.4. Modos de evaluación

Anteriormente hemos comentado que las dos medidas fundamentales para evaluar resultados van a ser el EVM (distorsión en banda) y el ACLR (distorsión fuera de banda). Para ambas, va a ser necesario cumplir los requisitos mínimos establecidos por el correspondiente estándar, estos se pueden consultar en [28, Tabla 6.5.2-1], [28, Tabla 6.5.2-2] y [28, Ap. 6.6.2], aunque los detallaremos en el próximo capítulo. Sin embargo, con las configuraciones que vamos a realizar no siempre va a ser posible cumplirlos, especialmente en materia de ACLR, por lo que vamos a tener que introducir un filtrado para reducir la energía fuera de banda, a costa de otros parámetros.

Para poder evaluar los efectos de este filtrado, vamos a definir dos modos de funcionamiento: el modo normal en el que evaluamos los efectos de integrar señales

y un segundo modo en el que se puede evaluar los efectos de dicho filtrado. Cuando el simulador opere en este segundo modo, se introducirá un filtro justo antes de la etapa de amplificación, que reduzca al máximo las componentes fuera de banda. Las características de dicho filtro son las siguientes:

- Filtro FIR Digital de orden 50
- Límite de la banda de paso: $BW_{\text{útil}}/2$
- Límite de la banda atenuada: $BW_{\text{canal}}/2$

El modo de funcionamiento se podrá cambiar desde el submenú "Modo de evaluación" del simulador, como se puede ver en la figura 2.15.

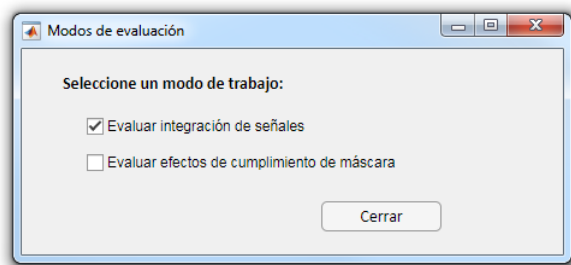


Figura 2.15: Ventana que permite cambiar el modo de funcionamiento del simulador.

En el próximo capítulo estudiaremos las mejoras que produce este filtrado en el ACLR a costa de la degradación de otros parámetros como son el EVM, apareciendo así un compromiso entre ellos.

Capítulo 3

Evaluación de resultados

EN el presente capítulo se exponen las evaluaciones que se han llevado a cabo en este trabajo mediante simulación y los resultados obtenidos en cada una de ellas. Dichas pruebas están orientadas a la obtención de los resultados necesarios para poder extraer las conclusiones pertinentes de acuerdo con los objetivos de este TFG. Para ello, se ha utilizado el simulador presentado en el capítulo anterior, y ampliado en el anexo A, con las configuraciones que comentaremos a continuación.

3.1. Consideraciones previas

Antes de entrar en los distintos escenarios y sus correspondientes resultados, conviene poner en contexto los valores que vamos a obtener, tanto en el caso del EVM como en el del ACLR, y hacer una serie de consideraciones acerca de la notación que se va a utilizar.

En primer lugar, vamos a hablar del EVM, medido en % según la ecuación 2.21. Para cada uno de los casos propuestos, se han hecho tres simulaciones, en las que se ha guardado el EVM promedio del PRB y, a partir de ellas, se han obtenido los siguientes tipos de resultados:

- **EVM avg.** Promedio de los tres EVM promedio obtenidos.
- **EVM max.** Máximo de los tres EVM promedio medidos.

Para poner en contexto estos resultados, tenemos que ver cuáles son los valores máximos permitidos que define el 3GPP para cada modulación, tanto para canales LTE/5G [28, Tabla 6.5.2-1], como para canales NB-IoT [28, Tabla 6.5.2-2]. Estos pueden consultarse en las tablas 3.1 y 3.2, respectivamente. En todos los escenarios se ha usado modulación 16-QAM para el canal PDSCH de 5G, sin embargo, se han

Modulación	EVM_{max}
QPSK	17,5 %
16-QAM	12,5 %
64-QAM	8 %
256-QAM	3,5 %
1024-QAM	2,5 %

Tabla 3.1: Valores de EVM (%) máximos permitidos en función de la modulación según el estándar para LTE/5G.

Modulación	EVM_{max}
QPSK	17,5 %

Tabla 3.2: Valores de EVM (%) máximos permitidos en función de la modulación según el estándar para NB-IoT

hecho pruebas con otras y se ha observado que las tendencias son extrapolables al resto de modulaciones. En cuanto a las medidas del ratio de potencia en canal adyacente (ACLR), simplemente señalar que el mínimo permitido es de 45 dB, según [28, Ap. 6.6.2].

Hay que apuntar también que en las evaluaciones realizadas se han modelado los efectos no lineales de un amplificador de potencia, concretamente, se ha utilizado el modelo ZHL-4240+ de Mini-Circuits, cuya hoja de características se recoge en el anexo D.

Por último, para una mayor simplicidad y para no sobrecargar todo el rato las tablas y representaciones, vamos a definir, como se indica en la figura 3.1, la serie de situaciones en las que ponemos al PRB de referencia sobre el que mediremos el EVM como:

- **Situación A.** El PRB se encuentra sólo, sin PRBs cercanos ocupados.
- **Situación B.** Los PRBs inmediatamente adyacentes al de referencia se encuentran ocupados; B.1 indica que sólo se ocupa uno de los dos y, B.2, que se ocupan los dos.
- **Situación C.** Los PRBs inmediatamente adyacentes se encuentran desocupados, pero se utilizan los situados a una distancia de 2 PRBs; C.1 indica que sólo se utiliza uno de los dos y, C.2, que se utilizan los dos.
- **Situación D.** Se ocupan todos los PRBs adyacentes.

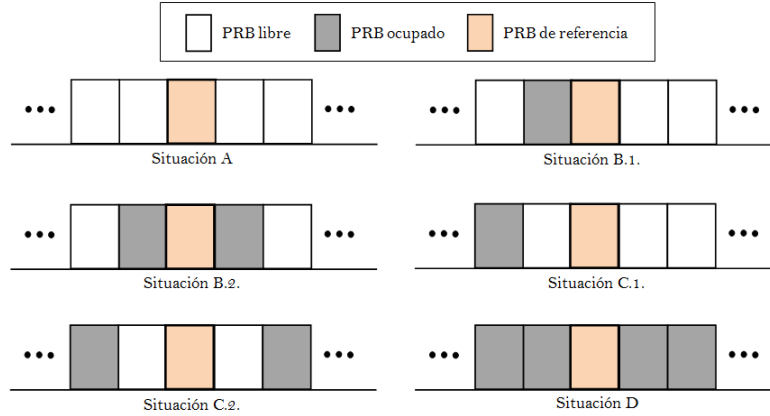


Figura 3.1: Representación gráfica de las diferentes situaciones en las que se pone al PRB de referencia para la evaluación de resultados.

3.2. Escenario 1: PRB en el medio del BW, no adyacente con canales IoT.

Pasamos ahora a ver la primera propuesta de estudio. Este primer escenario es el más sencillo, pero nos permitirá establecer un punto de partida y ver la magnitud de los resultados antes de pasar a los escenarios representativos de comunicaciones más avanzadas. En este caso, fijaremos un PRB de referencia en medio del BW, que será de 25 PRB, y mediremos su EVM en las diferentes situaciones comentadas en el apartado anterior. Las medidas van a realizarse utilizando el modelo de amplificador con una memoria de 1. Para que el lector pueda ver el error introducido por el amplificador, apuntar que el EVM sin él es muy pequeño, ha resultado menor que 0,005 % en todos los casos.

Primero, supondremos que las potencias de los diferentes PRBs son las mismas. En la figura 3.2 se ofrecen los resultados obtenidos, recogidos en la tabla B.1. En ella podemos ver ya un aspecto importante y es que, como cabe esperar, en la realidad OFDM no es completamente ortogonal como en la teoría, si no que es quasi-ortogonal. Por ello, se aprecia como el EVM del PRB es ligeramente menor cuando tiene espacios libres alrededor. Además, aunque la variación es muy pequeña, el EVM mejora cuando la ocupación lateral es simétrica.

Puede plantearse el lector si importarían mucho las diferencias que se observan, dado que su magnitud es relativamente pequeña. Sin embargo, haciendo referencia a la tabla 3.1 y recordando el uso de 5G e IoT en células pequeñas con canales razonablemente buenos, estas ligeras variaciones de EVM cobran mayor importancia.

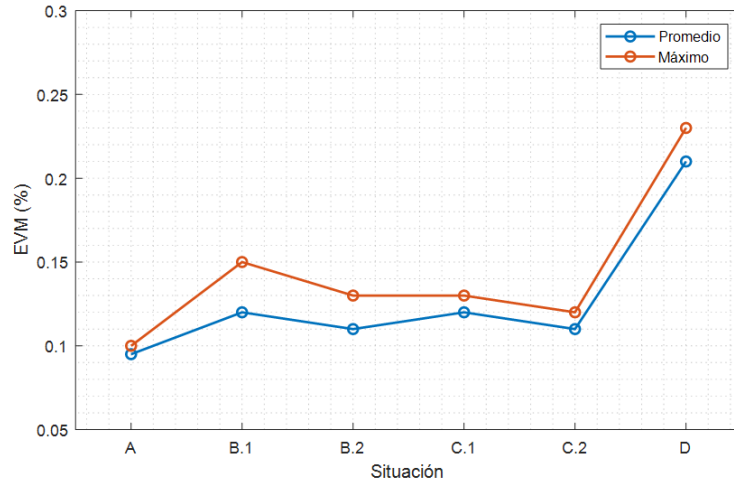


Figura 3.2: Variación del EVM del PRB de referencia para las 4 situaciones descritas anteriormente. Se considera que todos los PRB tienen la misma potencia.

Además, hay que tener en cuenta que este EVM se origina ya en el transmisor, por lo que cuanto menor sea, mejor.

Vamos a repetir este análisis pero, ahora, aumentando la potencia relativa del PRB de referencia. En la figura 3.3 se representan los resultados de las tablas B.2 y B.3:

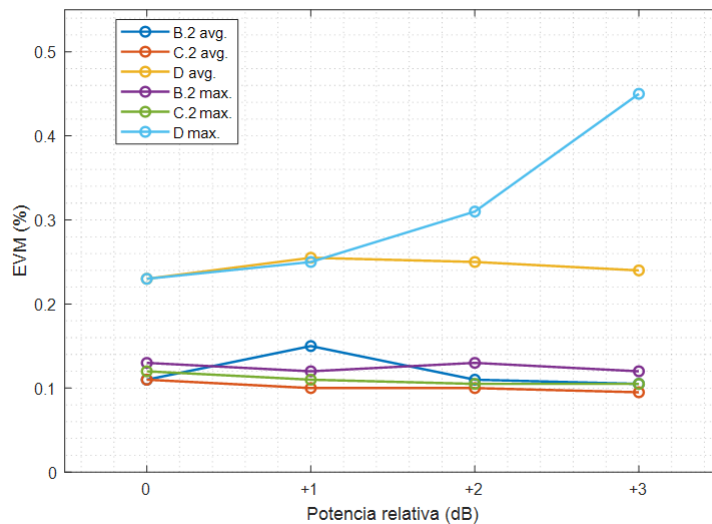


Figura 3.3: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 1, variando su potencia

De la representación se desprende, por una parte, lo comentado en el párrafo anterior y, por otra, que aumentar la potencia del PRB no mejora su EVM si sólo se tienen en cuenta los elementos que estamos considerando ahora ya que, al aumentar su potencia, aumentamos también la no linealidad producida. En otros casos, como

por ejemplo si consideráramos un canal con ruido, si que mejoraría, al aumentar la SNR. Del mismo modo, tenemos que ver cómo afecta aumentar la potencia del PRB de referencia a los PRB adyacentes. A continuación se ofrecen estos resultados, recogidos en las tablas B.4 y B.5.

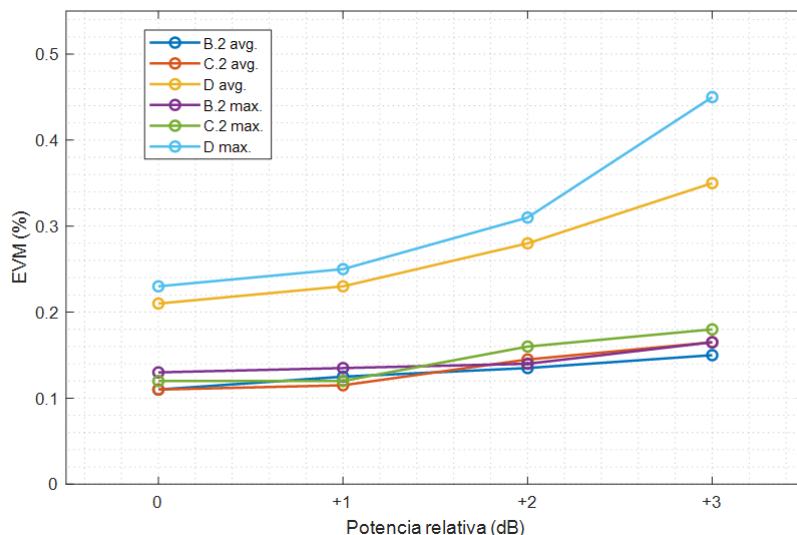


Figura 3.4: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 1, variando la potencia de los PRBs adyacentes.

Como se puede ver, el EVM de los PRB adyacentes sí que aumenta al incrementar la potencia del PRB de referencia, puesto que la no linealidad de los PRB con más potencia es mayor, lo cual deberá ser tenido en cuenta. Decir también que se han observado PAPR en todos los casos en torno a 12-13 dB, que es un valor bastante elevado. Esto demuestra lo que se había comentado acerca de la modulación OFDM y que dificulta la selección del punto de trabajo del amplificador.

3.3. Escenario 2: PRB en el medio del BW, adyacente a un canal IoT

En este escenario vamos a introducir ya las transmisiones de IoT. De manera análoga al anterior y con los mismos parámetros, elegimos un PRB de referencia, esta vez situado contiguo a una posición en la que se pueda transmitir un canal IoT en banda y calculamos su EVM en las situaciones que se han descrito. Adaptándolas a este escenario, el PRB que corresponda se ocupará con un canal de IoT en vez de con uno 5G. La figura 3.5 ilustra los datos recogidos en la tabla B.6.

De la figura se desprende lo mismo que en el apartado anterior pero, además vemos que los valores de EVM obtenidos ocupando canales adyacentes con señales

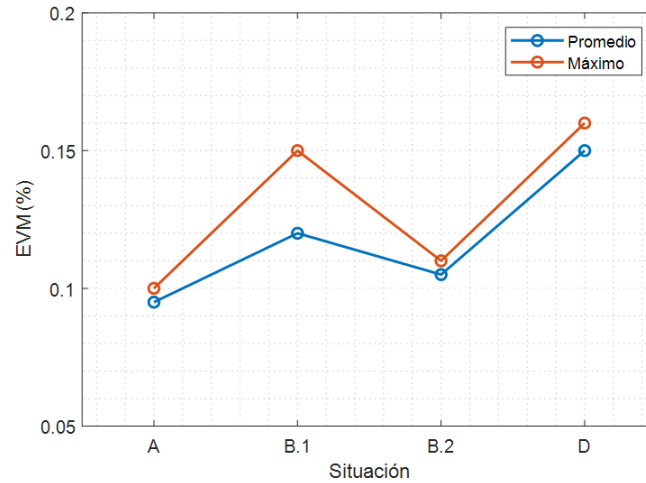


Figura 3.5: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 2, todos los PRB con la misma potencia.

5G o NB-IoT son similares. Por lo tanto, aunque lo comprobaremos en otros casos, se intuye ya que, efectivamente, NB-IoT cumple uno de sus objetivos y se adapta perfectamente a los esquemas de transmisión de LTE/5G.

En el anexo B se recogen medidas acerca de las variaciones del EVM cuando cambiamos la potencia relativa del PRB de referencia, pero no vamos a profundizar más en ellas al observarse lo mismo que en el escenario anterior.

3.4. Escenario 3: PRB en un extremo del BW, con canales NB-IoT en banda de guarda

Como se ha expuesto en el primer capítulo del presente TFG, NB-IoT no sólo puede funcionar en banda, si no que puede integrarse con señales 5G transmitiéndose en su banda de guarda. Para evaluar este modo de funcionamiento, vamos a situar ahora el PRB de referencia en un extremo de la señal en un sistema con 25 RB de manera que, a un lado tenga la señal 5G y, al otro, los canales IoT en banda de guarda. Procediendo de manera análoga, primero teniendo la misma potencia relativa en todos los canales, obtenemos los resultados recogidos en la tabla B.9 y representados en la figura 3.6.

Prestando atención a la tendencia que sigue el EVM se aprecia lo mismo que en los escenarios anteriores, el EVM aumenta cuánto más ocupados están los huecos adyacentes al PRB de referencia. De igual modo al apartado anterior, se recoge en el anexo B un estudio de lo que ocurre al aumentar la potencia del PRB, pero no aporta más de lo que se ha expuesto en el primer escenario.

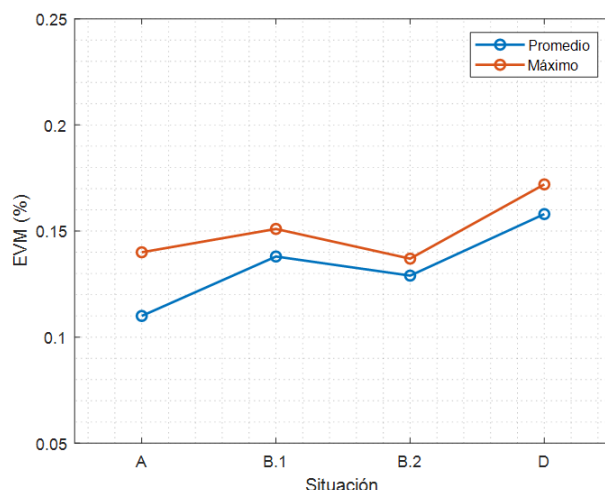


Figura 3.6: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 3, manteniendo constante la potencia de los PRBs adyacentes.

3.5. Escenario 4: Canal IoT transmitido en banda

Hemos visto lo que ocurre al incluir transmisiones IoT, pero lo hemos hecho desde el punto de vista del PRB de la señal 5G. Para ver globalmente lo que ocurre, es necesario tener en cuenta también lo que le pasa a la transmisión IoT, ya que de nada nos serviría optimizar una si estamos dificultando la otra. Con este propósito, vamos a repetir el análisis en las situaciones anteriores pero, ahora, midiendo el EVM en la señal IoT. Primero, vamos a tratar la transmisión de un canal IoT en banda, en un sistema con 25 RB. Los resultados se recogen en la tabla B.12 y se ilustran a continuación:

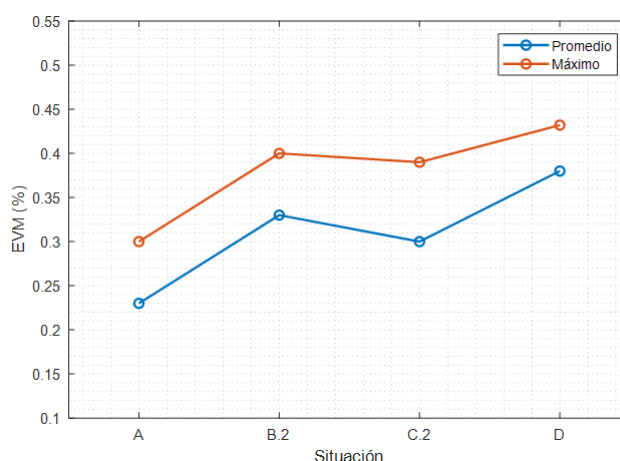


Figura 3.7: EVM(%) para un canal de IoT en el escenario 4, manteniendo constante la potencia de los PRBs adyacentes.

Se distingue la misma tendencia como, por otra parte, era esperable, ya que

la modulación empleada está igualmente basada en OFDM. Vamos a analizar ahora lo que ocurre al variar las potencias. En este caso, lo que vamos a hacer, para complementar las simulaciones anteriores, es variar la potencia de los PRBs adyacentes al canal de IoT, para ver cómo se ve afectado este. La figura 3.8 ilustra los resultados obtenidos:

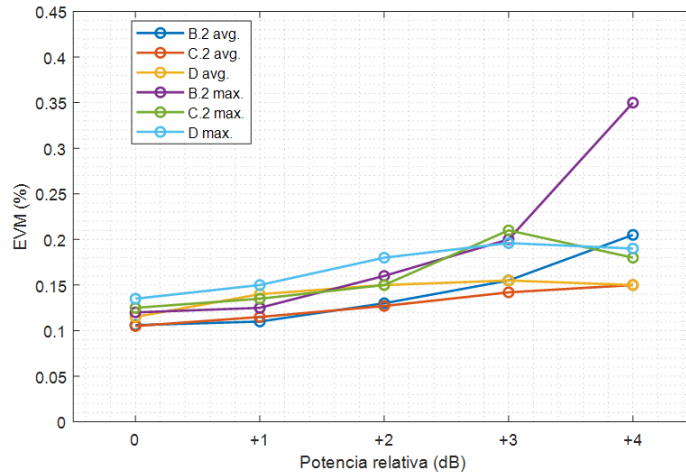


Figura 3.8: EVM(%) para un canal de IoT en el escenario 4, variando la potencia de los PRBs adyacentes.

Los valores numéricos concretos pueden consultarse en las tablas B.13 y B.14. De la figura se desprende lo mismo que para los PRB de la señal 5G, el EVM aumenta al aumentar la potencia de los PRB adyacentes debido a que la no linealidad que introducen aumenta, mientras que la potencia del canal IoT se mantiene. Esto es muy importante tenerlo en cuenta en este caso, ya que una de las máximas de las comunicaciones de IoT es que las potencias utilizadas sean lo más bajas posible. Por tanto, nos vamos a encontrar en muchas ocasiones que la potencia de estos canales sea menor que la de los PRB de 5G y entrará en juego este aspecto de diferencia de potencias.

3.6. Escenario 5: Canal IoT transmitido en banda de guarda

Siguiendo el escenario anterior, toca ahora ver lo que pasa en los canales IoT que operan en banda de guarda. En este caso, vamos a variar el análisis y lo vamos a adaptar a este modo de funcionamiento. Tomaremos ahora un canal IoT en banda de guarda y lo iremos alejando subportadora a subportadora de la señal de banda ancha, cuyos PRB cercanos a la señal IoT estarán ocupados y, además, variaremos

la potencia relativa de estos PRB. En este caso vamos a usar un sistema con 50 RB, para que la banda de guarda sea un poco más amplia y podamos introducir más de un canal. Los datos obtenidos a partir de este estudio, recogidos en la tabla B.15, se ilustran en la figura 3.9.

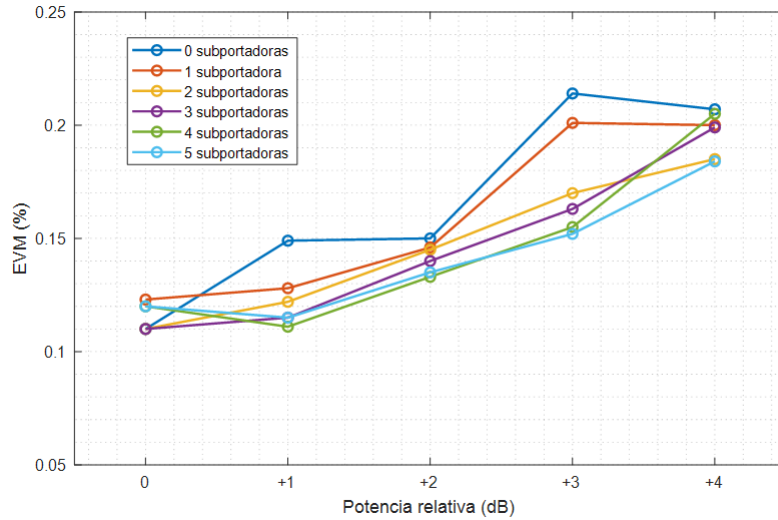


Figura 3.9: EVM(%) promedio para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal de banda ancha.

Con los canales IoT en banda de guarda vemos que alejarlos de la señal de banda ancha no tiene un claro efecto beneficioso. Esto puede deberse principalmente a que lo que podemos separar en banda de guarda es limitado debido al tamaño de la misma aunque, en cualquier caso, en la gráfica se puede ver como los EVM tienden a ordenarse según la separación del canal respecto a la señal 5G. Por otra parte, al aumentar la potencia de los PRB cercanos sí que se ve claramente como el EVM del canal se ve afectado, tal y como nos ocurría en casos anteriores.

En el correspondiente anexo se recogen también los valores máximos que se alcanzan, pero no vamos a entrar más en detalle acerca de ellos ya que siguen la misma tendencia aunque de una manera menos clara, al tratarse de valores máximos y no de promedios.

Nos queda ahora otro supuesto que tratar en el caso de transmisión en banda de guarda, y es cuando se transmiten varios canales a través de la misma. Para ver los efectos, vamos a simular, a partir del sistema anterior, una transmisión con dos canales IoT pegados y separados una subportadora de la señal 5G. En la figura 3.10 y en las tablas B.17 y B.18 se recogen los resultados, identificando como canal 0 el más cercano a la señal 5G.

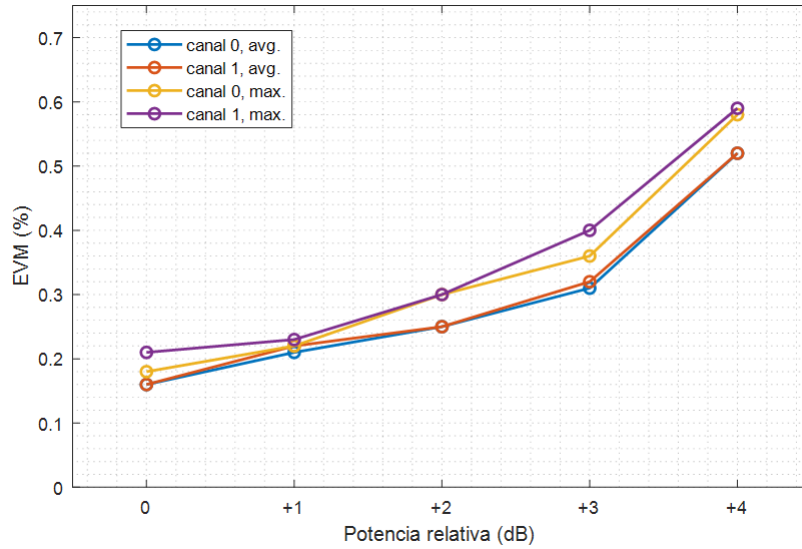


Figura 3.10: EVM(%) en canales de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cuando se transmiten dos canales en la banda de guarda.

Como se puede apreciar, el comportamiento de ambos canales es prácticamente idéntico y, además, ambos reaccionan de la misma forma a incrementos de potencia en PRBs de la señal de banda ancha. Desde este punto de vista sería indiferente transmitir la información más sensible en los canales cercanos a la señal 5G o en los lejanos, sin embargo, veremos que hay que tener en cuenta otros factores.

3.7. Escenario 6: Evaluación del compromiso EVM/ACLR

Hasta ahora, nos hemos centrado en la cuantificación de la distorsión en banda, sin tener en cuenta lo que sucediera fuera de ella. Sin embargo, como se ha apuntado en el primer apartado del presente capítulo, también hay unas restricciones para el ACLR. Estas restricciones son bastante exigentes, por lo que transmitir señales en la banda de guarda va dificultar su cumplimiento. Para ver y evaluar estas cuestiones, vamos a calcular el ACLR en diferentes situaciones. En el anexo B se incluyen medidas realizadas sin amplificador, sin embargo, al ser éste el principal causante de la distorsión en el transmisor, vamos a tratar aquí el caso en que se modela el amplificador, usando un modelo con memoria de 1. El sistema utilizado para la transmisión es el que consta de 25 PRB.

Vamos primero a evaluar el ACLR como hasta ahora, sin aplicar ningún procesado además del sistema de linealización: sin transmitir IoT en banda de guarda, transmitiendo IoT en banda de guarda pegada a la señal 5G y transmitiendo IoT en

banda de guarda pero centrada en ella. Los resultados, mostrados a continuación, se recogen en la tabla B.22:

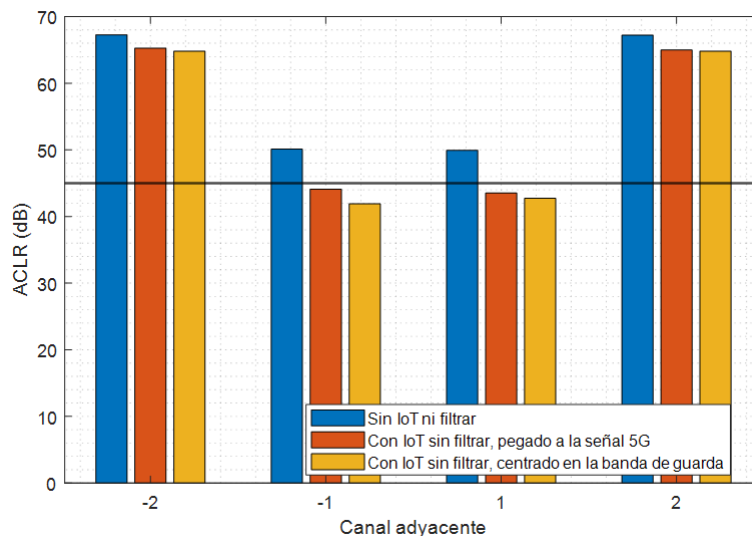


Figura 3.11: ACLR en el escenario 6 en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1 y sin filtrado

Vemos que, si introducimos señales en la banda de guarda, aunque estén completamente pegadas a la señal 5G, no cumplimos los requerimientos de potencia en canal adyacente. El lector puede apreciar que no se cumple por muy poco, sin embargo, cabe recordar que sólo estamos modelando el amplificador. En la realidad, habrá otros componentes que introduzcan no linealidades y, además, entran en juego las no idealidades del transmisor, que no harán sino aumentar la potencia emitida fuera de banda. Por ello, se hace necesario un filtrado previo a la amplificación que reduzca esta potencia en canales adyacentes. Aplicando esto, se obtienen los resultados que muestra la figura 3.12, donde se ve que el ACLR aumenta considerablemente.

Aunque parezca que ya hemos solucionado el cumplimiento de las restricciones de la normativa, tenemos que ver la viabilidad de este filtrado en términos de EVM ya que, como se ha ido comentando, existe un compromiso. Para evaluar el EVM en estos casos, situamos un canal IoT en la banda de guarda y lo vamos alejando progresivamente de la señal 5G subportadora a subportadora. En ambos casos, medimos los EVM sin aplicar y aplicando filtrado y para la señal 5G y el canal IoT.

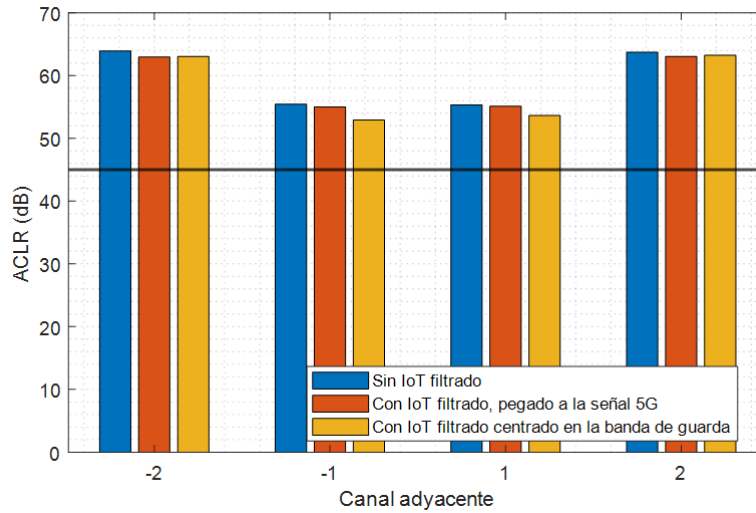


Figura 3.12: ACLR en el escenario 6 en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1 y filtrado.

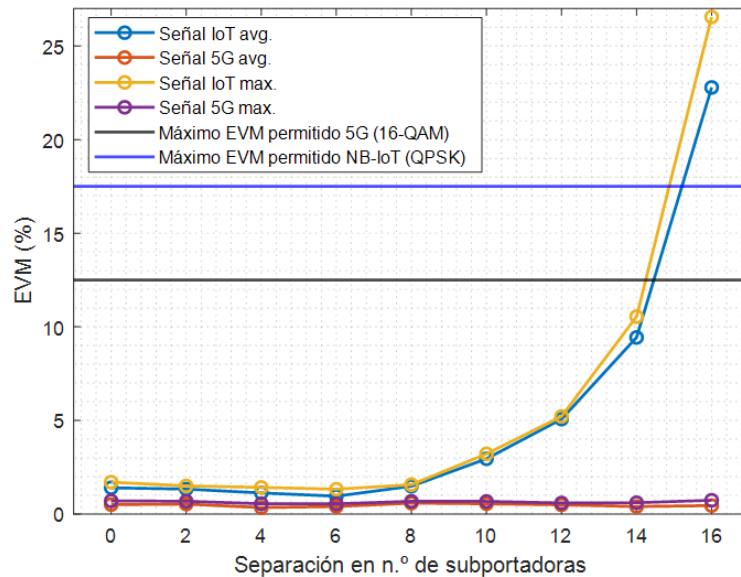


Figura 3.13: Variación del EVM en el escenario 6 al alejar progresivamente el canal IoT de la señal 5G, en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1 y filtrado.

Observando los resultados, ilustrados en la figura 3.13 y recogidos en las tablas B.21 y B.21, se aprecia que, al filtrar, aumenta el EVM. Este incremento se da especialmente en los canales IoT transmitidos en banda de guarda. La variación del EVM en las señales IoT dependerá de su posición, tamaño de la banda de guarda, etc. En la figura 3.13 se puede ver la evolución del EVM al ir alejando el canal de IoT subportadora a subportadora de la señal 5G. Como se aprecia, alejarlos excesivamente hace que el EVM del canal IoT aumente mucho, llegando incluso a

hacer inviable la transmisión. Además, se puede ver la tendencia de que el EVM desciende cuando la separación no es excesiva (hasta unas 6 subportadoras en este caso), esto refleja lo comentado en el apartado anterior, y se advierte porque el efecto del filtrado no es excesivamente notable todavía.

3.8. Escenario 7: Evaluación de los efectos al cambiar de numerología

Una de las principales novedades en la capa física que introducen las *releases* del estándar conocido como *New Radio* es la posibilidad de variar la numerología. Por tanto, para tener una caracterización más o menos completa de cómo se comporta el amplificador vamos ahora a ver cuál es el comportamiento del EVM y del ACLR al variar tanto la numerología como el ancho de banda.

Para ello, se han seleccionado dos modelos de test distintos, descritos en la implementación del simulador, en el rango de frecuencias FR1: NR-FR1-TM3.1 y NR-FR1-TM3.2. Se han escogido de manera que tengamos ejemplos para diferentes modulaciones y para casos en los que la potencia a lo largo de la banda es uniforme y no uniforme. Las medidas se han realizado para $\mu = 0, 1, 2$. Todas ellas pueden encontrarse en el correspondiente apartado del anexo B. A modo de ejemplo, vamos a ver aquí los resultados para el modelo de test NR-FR1-TM3.1, usando amplificador con memoria de 1.

En lo que se refiere al EVM, no se ha observado ninguna tendencia que indique que el amplificador se comporte mejor con una numerología u otra, ya que el EVM es similar para todas, tal y como se puede observar en la figura 3.14. Esto se repite para el otro modelo de test, como se puede ver también en la figura B.8 del anexo.

Vamos a ver ahora lo que ocurre con el ACLR. En la figura 3.15 se muestran los resultados de ACLR para las mismas situaciones que hemos calculado el EVM. Como se puede apreciar, el ACLR para cada uno de los canales adyacentes se mantiene bastante similar para todas las configuraciones de ancho de banda y numerología, ocurriendo lo mismo para el otro modelo de test. Por tanto, con los resultados obtenidos y teniendo en cuenta el alcance de este trabajo, la elección de la numerología deberá hacerse teniendo en cuenta los beneficios de cada una a la hora de transmitir por un canal u otros condicionantes.

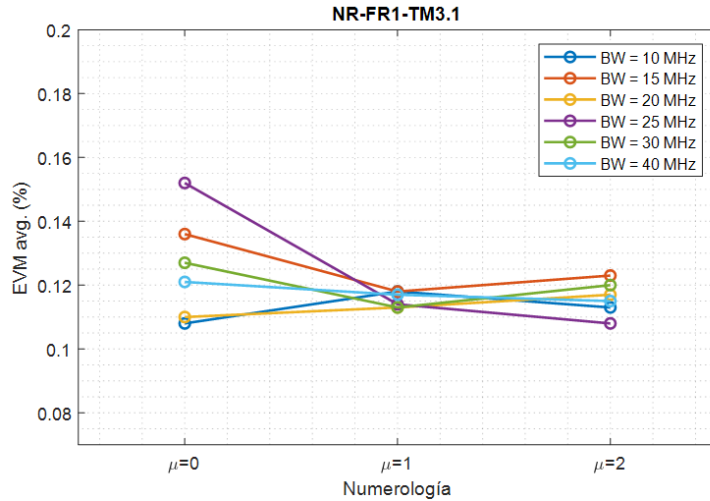


Figura 3.14: EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria.

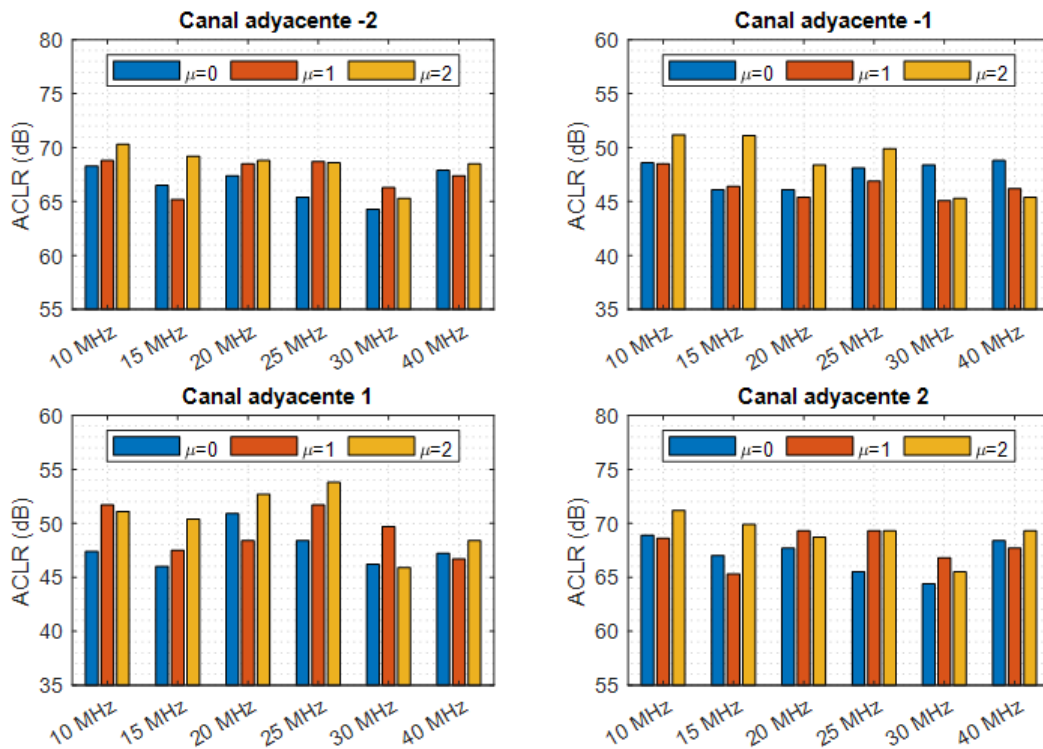


Figura 3.15: ACLR para una señal 5G al cambiar numerología y ancho de banda, usando el modelo NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria 1.

3.9. Escenario 8: Simulación de modelos de canal

Como última prueba, en este escenario vamos a simular una transmisión completa a través de un canal EVA con una frecuencia Doppler máxima de 30 Hz, simplemente,

a modo de ejemplo, para comprobar el funcionamiento de los bloques canal radio y receptor ya que, como hemos comentado, no vamos a profundizar en este aspecto. En el anexo B, se pueden encontrar el ejemplo para un canal ETU.

El canal EVA pretende modelar comunicaciones para terminales con movilidad media, muy común en escenarios con vehículos. En la figura 3.16 se refleja la constelación recibida transmitiéndose, en este caso, una modulación de 64-QAM.

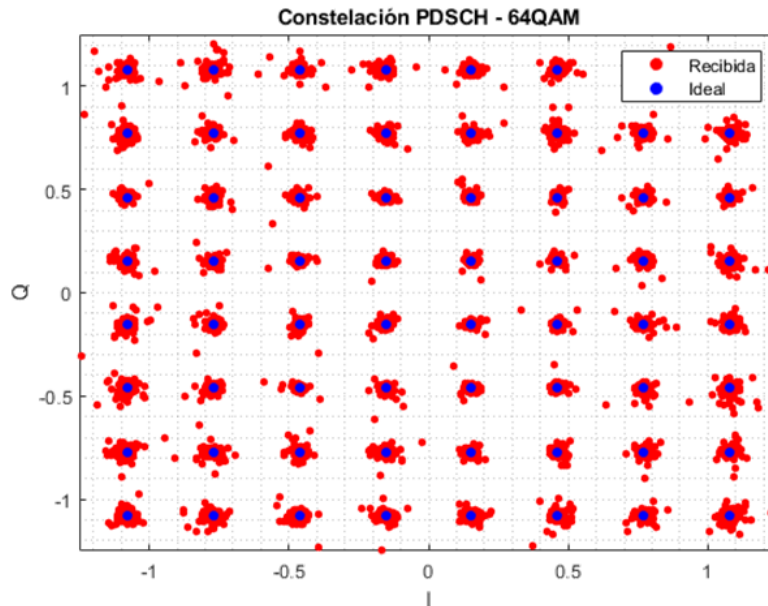


Figura 3.16: Comparación de la constelación recibida respecto de la ideal en una transmisión a través de un canal EVA con frecuencia Doppler máxima de 30 Hz usando modulación 64-QAM.

Por otra parte, podemos calcular la tasa de error de bit en el canal de datos de la transmisión realizada (sin realizar ningún procesado de nivel superior).

```
*** Cálculo de BER ***
BER canal PDSCH, señal 5G = 1,00E - 04
```

3.10. Recopilación de resultados

Para terminar este capítulo, vamos a recuperar las conclusiones extraídas de los resultados que hemos obtenido a lo largo de los diferentes escenarios y simulaciones que se han llevado a cabo.

Por un lado, ha quedado claro como NB-IoT es un estándar que se adapta perfectamente a los esquemas de transmisión de LTE/5G, dado que los EVM

obtenidos con PRBs adyacentes de los dos estándares es similar, sin embargo, hay varios aspectos a tener en cuenta.

Se ha comprobado como el EVM al asignar PRBs contiguos aumenta ligeramente respecto al caso en el que se transmite aislado. Por tanto, a la hora de repartir los recursos radio sería interesante, siempre que fuera posible, empezar a asignarlos dejando cierta separación entre ellos. Esto cobra mayor importancia cuando se transmiten PRBs con diferentes potencias, por lo que debe priorizarse que los PRBs con mayor potencia tengan huecos alrededor y que estos sean los últimos en asignarse.

En cuanto a transmisiones IoT, se deben tener varias cosas en cuenta. Hemos visto que el EVM en los dos modos de transmisión era muy similar. Sin embargo, cuando se transmiten canales en la banda de guarda, se tienen dificultades para cumplir los requerimientos de potencia en canal adyacente y se hace necesario un filtrado. Es por ello que, en ese caso, se recomienda transmitir primero en los huecos disponibles en banda y, después, llenar la banda de guarda empezando por la parte más cercana a la señal 5G. Además, sería razonable no colocar los PRB de mayor potencia al lado de los canales IoT, ya que estos transmiten potencias más bajas y se verían más afectados.

Otra de las cuestiones tratadas era ver si afectaba de manera diferente el amplificador según la numerología. En este caso, como se ha comentado, no se ha visto ninguna tendencia en términos de EVM o ACLR que indique la ventaja de una u otra, al menos con el alcance de este trabajo. Es por ello que, en cuanto a numerologías, deberán utilizarse otros criterios a la hora de realizar la elección.

Capítulo 4

Conclusiones

EN este capítulo final y para concluir el presente TFG, se incluye un resumen y análisis de los resultados obtenidos, además de consecuencias que se desprenden de los mismos, sus beneficios y su aplicabilidad de cara a los sistemas reales. Además, se comentan diversas vías de investigación prometedoras de cara al futuro y posibles formas de completar o ampliar este trabajo.

4.1. Conclusión

Recapitulando lo desarrollado, a lo largo de la memoria se han descrito las bases teóricas que fundamentan los estándares de comunicaciones móviles utilizados en este trabajo, se ha expuesto cómo modelar efectos que aparecen en sistemas reales y se han explicado las características y cómo se ha implementado el simulador que nos ha permitido obtener los resultados comentados en el capítulo anterior y que vamos a resumir brevemente a continuación.

Respecto a dichos resultados, hay que apuntar que el EVM de un PRB se ve afectado por el estado de los RB que tiene alrededor, aumentando cuando estos RB adyacentes se ocupan. Por otro lado, hemos visto como aumentar la potencia del PRB no disminuye su propio EVM (si sólo tenemos en cuenta efectos de elementos no lineales) y que, sin embargo, sí que hace que aumente el de los RB adyacentes. Esto es aplicable tanto a las señales 5G como a las de NB-IoT. Además, se ha observado cómo el ACLR aumenta al incluir señales en banda de guarda y el compromiso que existe entre éste y el EVM.

Volviendo ahora a lo que motivaba la realización del presente trabajo, todas estas conclusiones deberán tenerse en cuenta, por un lado, para proponer mejoras y medidas correctoras a los efectos que se producen en el transmisor y, por otro, en el *scheduler* para optimizar el reparto dinámico de recursos radio. Generalmente, este

scheduling se hace teniendo en cuenta únicamente cuáles son los recursos disponibles y los usuarios que desean transmitir. Sin embargo, como hemos observado a lo largo del trabajo, existen configuraciones más óptimas que pueden mejorar la eficiencia y prestaciones de la transmisión. De este modo, el orden que deberá tratar de seguir el *scheduler* a la hora de asignar los PRB se establecerá a partir de las conclusiones obtenidas, con el objetivo de minimizar el EVM. Se tendrán en cuenta tanto los recursos radio ya asignados y la potencia que se transmite por cada uno de ellos como, incluso, cuáles son los servicios más sensibles y que necesitan transmitir, por tanto, de manera más fiable. Por supuesto, estas ideas deberán adaptarse en caso de que ya existan otras directivas o reglas para el *scheduler*.

Otro aspecto que merece destacarse es que el simulador desarrollado es un resultado fundamental del trabajo, puesto que permite una gran versatilidad a la hora de realizar simulaciones, manteniendo una simplicidad notable para el usuario. Además, debido a que se ha desarrollado con vistas al futuro, facilitará la integración de nuevos módulos, esquemas de transmisión u opciones adicionales que se requieran para otros trabajos.

Asimismo, apuntar que se han cumplido satisfactoriamente los objetivos marcados para el presente TFG. Hemos desarrollado una herramienta que permite simular un amplio abanico de los esquemas de comunicaciones móviles actuales y que, además, es fácilmente adaptable para integrar los esquemas que están actualmente en desarrollo. Este simulador, además, tiene en cuenta los efectos típicos de sistemas reales que producen degradación, modelando elementos no lineales a partir de medidas reales o el canal de transmisión radio a partir de los modelos recogidos en el estándar. Usando esta herramienta se ha generado una notable variedad de configuraciones y se han evaluado sus prestaciones en términos de distorsión en banda (EVM) y fuera de ella (ACLR).

4.2. Cronología

En cuanto a desarrollo temporal y planificación, el trabajo se ha llevado a cabo entre los meses febrero y junio de 2020. En la figura 4.1, se presenta un Diagrama de Gantt en el que se recogen las diferentes fases seguidas a lo largo de estos meses, las cuales se corresponden con los hitos marcados para el TFG, y la duración de cada una de ellas.

Como se puede apreciar, se han cumplido satisfactoriamente los requisitos temporales marcados al inicio del proyecto.

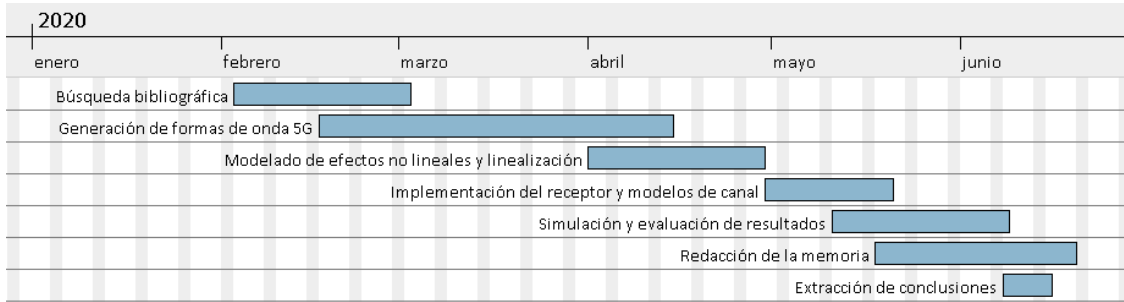


Figura 4.1: Diagrama de Gantt del TFG.

4.3. Líneas futuras de trabajo

Tomando como punto de partida este trabajo, son varias las posibles líneas de investigación que pueden seguirse para mejorarlo y ampliar su alcance. Además, dado que 5G está actualmente en desarrollo, van a poder fácilmente seguirse nuevos caminos.

Por un lado, hemos hablado a lo largo del trabajo del modelado de elementos reales como son el amplificador de potencia o la fibra óptica. Ya que con esta última no se ha llegado a experimentar y evaluar resultados y debido a su creciente uso, sería interesante realizar un estudio más en detalle acerca de estas arquitecturas de radio 5G sobre fibra, cuyo modelado permite el simulador. Siguiendo en la misma línea, se podría dotar al simulador de nuevas funcionalidades, de evaluación de servicios concretos, ampliar las posibilidades con las arquitecturas *New Radio*, incluir posibilidad de transmisiones MIMO, etc. o incluso adentrarse en las capas superiores para poder realizar estudios más exhaustivos de *Bit Error Rate (BER)* o *throughput*. La implementación de estas últimas permitiría, por ejemplo, estudiar los diferentes modelos de canal y los BER que se obtienen con cada uno de ellos.

Se podría, también, seguir completando el modelo del transmisor y/o receptor, incluyendo otros bloques que incorporasen efectos no lineales y desequilibrios existentes en los mismos: desequilibrios I/Q, desajustes de frecuencia y tiempo, ruido de fase, etc.

Por otra parte, como ya se ha apuntado previamente en este trabajo, en los sistemas de comunicaciones móviles actuales no sólo se necesita integrar la señal de banda ancha con señales IoT, sino que también aparecen otros servicios como son las comunicaciones para misión crítica. Así, una caracterización similar a la realizada de la integración de 5G con las señales TETRA [33] completaría notablemente el trabajo, aportándole un gran valor.

Otra línea de trabajo incluiría completar los hitos iniciales previstos para el

trabajo y que, dadas las circunstancias, se han tenido que adaptar. Así, la evaluación y verificación en un sistema físico de los resultados obtenidos mediante simulación sería una continuación directa del TFG. Para ampliar las evaluaciones, podrían proponerse nuevos escenarios más concretos, de situaciones específicas.

Por último, en relación a la implementación software realizada, a lo largo del trabajo se ha tratado de optimizar el código desarrollado adaptándolo al entorno MATLAB[®], pero podrían plantearse nuevos algoritmos que persigan una mayor eficiencia, reduciendo así la carga computacional del simulador. Esto sería de utilidad para realizar, por ejemplo, cálculos precisos de BER, ya que se necesitan simulaciones de mayor duración temporal que implican, por tanto, un mayor coste de procesado.

Bibliografía

- [1] P. García-Dúcar and F. Gutierrez-Soler. Tema 5. Servicios y Sistemas Móviles. Asignatura de Servicios y Sistemas de Telecomunicación. Universidad de Zaragoza, 2019.
- [2] A. Bleicher. LTE-Advanced is the real 4G. *IEEE Spectrum*, 2013. [Online] Available: <https://spectrum.ieee.org/telecom/standards/lte-advanced-is-thereal-4g>.
- [3] International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector (ITU-R). *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. Report ITU-R M.2410-0.
- [4] A.A. Zaidi, R. Baldemair, M. Andersson, S. Faxer, V. Molés-Cases, and Z. Wang. Designing for the future: The 5G NR Physical Layer. *Charting the Future of Innovation*, 07-2017. [Online] Available: <https://www.ericsson.com/49e9d0/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2017/designing-for-the-future---the-5g-nr-physical-layer.pdf>.
- [5] Qualcomm Technologies, Inc. Accelerating the mobile ecosystem expansion in the 5G Era with LTE Advanced Pro. [Online] Available: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/accelerating-the-mobile-ecosystem-expansion-in-the-5g-era-with-lte-advanced-pro.pdf>, May 2018.
- [6] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y Agenda Digital. Plan Nacional 5G. [Online] Available: https://avancedigital.gob.es/5G/Documents/plan_nacional_5g.pdf.
- [7] Fundación Endesa. Smart Cities. [Online] Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-smart-city>.

- [8] Luis Orús Gracia. Diseño e implementación de una aplicación de transmisión y recepción de señales multiportadora enfocadas a redes 4G y 5G. Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza, 2016.
- [9] A. Hernández-Solana and A. Valdovinos-Bardají. Tema 4. interfaz radio. Asignatura de Redes y Servicios de Comunicaciones Móviles. Universidad de Zaragoza, 2019.
- [10] 3GPP. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*. TS 36.211 version 14.2.0 Release 14.
- [11] "ShareTechnote". *Sharetechnote.com*. [Online] Available: https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE.html.
- [12] J.L. Walsh. A closed set of normal orthogonal functions. *American Journal of Mathematics*, pages 45(1):5–24, 1923.
- [13] Rohde & Schwarz. *LTE Transmission Models and Beamforming*, Jul. 2015. [Online] Available: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma186/1MA186_2e_LTE_TMs_and_beamforming.pdf.
- [14] 3GPP. *5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*. TS 38.101-1 version 15.3.0 Release 15.
- [15] 3GPP. *5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone*. TS 38.101-2 version 15.3.0 Release 15.
- [16] A. del Solar. 5G Boot Camp. Part one: 5G NR Technology overview. Keysight Technologies, May 2019.
- [17] "ShareTechnote". *Sharetechnote.com*. [Online] Available: https://www.sharetechnote.com/html/5G/Handbook_5G_Index.html.
- [18] 3GPP. *5G; NR; Physical channels and modulation*. TS 38.211 version 15.2.0 Release 15.
- [19] C. B. Mwakwata, H. Malik, M. M. Alam, Y. L. Moullec, S. Parand, and S. Mumtaz. Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(11), 2613, 2019. [Online] Available: <https://doi.org/10.3390/s19112613>.

-
- [20] J. Schlien and D. Raddino. Narrowband Internet of Things. Dec. 2016. [Online] Available: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf.
- [21] 3GPP. *Work Item Description Enhancements of NB-IoT*. RP-161324 3GPP.
- [22] J. de Mingo and P.L. Carro. Tema 5. Introducción al Software Defined Radio (SDR) y al tratamiento de señales en sistemas de RF. Apuntes de la asignatura de Tecnologías de Radiofrecuencia. Universidad de Zaragoza.
- [23] Carlos Mateo Pérez. *Contribución a la mejora de la eficiencia y linealidad de arquitecturas híbridas RF-ópticas (HRF) para sistemas de comunicaciones móviles*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Julio 2019.
- [24] Changsoo Eun and E. J. Powers. A new Volterra predistorter based on the indirect learning architecture. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(1):223–227, 1997.
- [25] M. Schetzen. Theory of pth-order inverses of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 23(5):285–291, 1976.
- [26] Telefonica and Ericsson. Cloud RAN Architecture for 5G. [Online] Available: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/WhitePaper_C-RAN_for_5G_-Telefonica_Ericsson.PDF.
- [27] J. Mateo, M.A. Losada, and I. Garcés. Dispositivos y Sistemas de Transmisión Óptica. Apuntes de la asignatura. Universidad de Zaragoza, 2017.
- [28] 3GPP. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*. TS 36.104 version 14.3.0 Release 14.
- [29] 3GPP. *5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. TR 38.901 version 15.0.0 Release 14.
- [30] Webster, D.L. and Hudgens, Rick and Lie, Donald. Replacing Error Vector Magnitude Test with RF and Analog BISTs. *Design & Test of Computers, IEEE*, 28:66 – 75, 01 2012.
- [31] 3GPP. *5G; NR; Base Station (BS) conformance testing. Part 1: Conformance testing*. TS 38.141-1 version 15.0.0 Release 15.

- [32] 3GPP. *5G; NR; Base Station (BS) conformance testing. Part 2: Radiated conformance testing*. TS 38.141-2 version 15.1.0 Release 15.
- [33] ETSI. Tetra. [Online] Available: <https://www.etsi.org/technologies/tetra>.