



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 202008

EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LTE-A/5G-NR PARA APLICACIONES INDUSTRIALES TIME-CRITICAL

GUILLERMO LACALLE MARCOS

**TUTORES: RAFAEL GONZÁLEZ AYESTARÁN
IÑAKI VAL BEITIA**

JULIO 2020

AGRADECIMIENTOS:

A la EPI de Gijón y en especial a Rafael González Ayestarán mi tutor de este TFM y a Samuel Ver Hoeye, por sus conocimientos, por su ayuda y por la formación recibida.

A Ikerlan y a todo su personal por la acogida y la enorme oportunidad de integrarme en la Empresa. Mil gracias.

Muy especialmente a Iñaki y a Óscar que siempre han estado ahí e hicieron que todo fluyera con naturalidad, por su disposición constante y por todo lo que me enseñaron y me apoyaron. No hay palabras para expresar este agradecimiento.

A mi madre y a mi padre.



Índice

1	Introducción.....	1
1.1.	<i>Motivación</i>	<i>1</i>
1.2.	<i>Estado del arte</i>	<i>2</i>
1.2.1.	La primera generación (1G).....	3
1.2.2.	La segunda generación (2G)	3
1.2.3.	La tercera generación (3G)	5
1.2.4.	La cuarta generación (4G/LTE)	8
1.2.5.	La quinta generación (5G)	13
1.3.	<i>Estructura del trabajo</i>	<i>15</i>
2	Técnicas de acceso al medio y modulaciones	18
2.1.	<i>OFDM</i>	<i>18</i>
2.1.1.	Definición.....	18
2.1.2.	Transmisor y receptor LTE	19
2.1.3.	Problemas en OFDM.....	21
2.2.	<i>OFDMA y SC-FDMA</i>	<i>24</i>
2.2.1.	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA).....	24
2.2.2.	Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).....	25
3	Estructura temporal y frecuencial en LTE	31
3.1.	<i>Unidades de información</i>	<i>31</i>
3.2.	<i>Configuración Downlink/Uplink</i>	<i>33</i>
3.3.	<i>Introducción a señales y canales físicos.....</i>	<i>36</i>
4	Técnicas de codificación	39
4.1.	<i>Cyclic Redundancy Check</i>	<i>39</i>



4.2. Código Convolutacional	40
4.3. Interleaving y Rate Matching	41
4.4. Scrambling	47
5 Señales y canales físicos en Downlink	49
5.1. Primary Synchronization Signal (PSS)	49
5.2. Secondary Synchronization Signal (SSS)	51
5.3. Reference Signals (RS)	53
5.3.1. Específicas de celda	53
5.3.2. Específicas de usuario	55
5.4. Physical Broadcast Channel (PBCH).....	55
5.5. Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	56
5.6. Physical HARQ Indicator Channel (PHICH).....	58
5.7. Physical Downlink Control Channel (PDCCH).....	61
5.8. Physical Downlink Shared Channel (PDSCH).....	64
5.8.1. Generación	65
6 Señales y canales físicos en Uplink	68
6.1. Demodulation Reference Signals (DM-RS)	68
6.2. Sounding Reference Signals (SRS).....	70
6.3. Physical Uplink Control Channel (PUCCH)	72
6.3.1. Channel Quality Indicator (formato 2).....	72
6.3.2. Hybrid Asynchronous (formatos 1a/1b)	74
6.3.3. Scheduling Request	79
6.3.4. Multiplexación de la señalización de control y datos en PUSCH	80
6.3.5. Técnicas multi-antena	82
6.3.6. Diversidad de antenas closed-loop	82
6.3.7. MU-MIMO o SDMA	83
6.4. Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)	83



6.5. <i>Physical Random Access Channel (PRACH)</i>	86
6.5.1. Proceso Random Access basado en contención	86
6.5.2. Proceso Random Access libre de contención	89
6.5.3. Diseño del PRACH	89
7 Capas en LTE	94
7.1. <i>Capa PHY</i>	94
7.2. <i>Capa MAC</i>	95
7.3. <i>Capa RLC</i>	95
7.4. <i>Capa PDCP</i>	96
7.5. <i>Capa RRC</i>	96
7.6. <i>Bearer</i>	99
8 Primera recepción Downlink	103
8.1. <i>Sincronización</i>	103
8.1.1. Número de celda	103
8.1.2. Prefijo cíclico.....	103
8.1.3. Multiplexación	104
8.1.4. Subtrama	104
8.1.5. Grupo de celda	104
8.1.6. Resultado correlaciones	105
8.2. <i>Master Information Block</i>	106
8.2.1. Pilotos de referencia y ecualización	106
8.2.2. PBCH	106
8.3. <i>Control Format Indicator</i>	108
8.3.1. PCFICH	108
8.3.2. Grid Recuperado.....	109
8.4. <i>Downlink Control Indicator</i>	109
8.4.1. RNTI	109



8.4.2. Decodificación ciega.....	110
8.5. <i>System Information Block</i>	111
8.5.1. SIB1.....	111
8.5.2. SIB2.....	114
9 Proceso Random Access.....	119
9.1. <i>Preámbulo</i>	119
9.2. <i>Respuesta al preámbulo</i>	123
9.2.1. DCI con RA-RNTI	123
9.2.2. RARM.....	123
10 Proceso Radio Resource Control	125
10.1. <i>RRC Connection Request</i>	126
10.2. <i>RRC Connection Setup</i>	128
10.3. <i>RRC Connection Setup Complete</i>	134
11 Estructura MAC PDU.....	137
11.1. <i>Ping UE -> eNB</i>	140
11.2. <i>Transmisión periódica de BSR</i>	144
11.3. <i>Respuesta eNB -> UE</i>	145
11.4. <i>Transmisión periódica de PHR</i>	147
12 Comunicación Post Attaching	149
12.1. <i>Channel State Information</i>	149
12.1.1. <i>Precoding Matrix Indicator</i>	149
12.1.2. <i>Channel Quality Indicator</i>	151
12.1.3. <i>Rank Indicator</i>	152
12.1.4. <i>Modos de transmisión CSI</i>	153
12.2. <i>Solicitud de datos</i>	157
12.2.1. <i>UCI con Scheduling Request en PUCCH</i>	157



12.2.2. DCI formato 0 en PDCCH	161
12.2.3. Datos en PUSCH.....	163
12.2.4. HARQ en PHICH	164
12.2.5. Datos en PDSCH.....	164
12.2.6. UCI con HARQ en PUCCH.....	172
12.3. <i>Paginado</i>	174
12.3.1. Paging Frame	174
12.3.2. Paging Occasion.....	174
13 Introducción a 5G.....	176
13.1. <i>Estructura temporal y frecuencial de la trama</i>	177
13.2. <i>Beam Management</i>	177
13.3. <i>Sincronización</i>	180
13.4. <i>PDCCH y PDSCH</i>	182
13.5. <i>PUCCH y PUSCH</i>	184
13.6. <i>Resumen 5G</i>	185
14 Conclusiones y Líneas Futuras	186
Referencias.....	188



Lista de tablas

Tabla 1.1. Comparación entre las generaciones desde 1G hasta 5G [14].....	14
Tabla 3.1. Parámetros que constituyen la estructura de una trama en LTE.	32
Tabla 3.2. Configuración Downlink/Uplink para cada subtrama.	34
Tabla 3.3. Estructura temporal de una subtrama tipo Switch.	35
Tabla 3.4. Canales físicos del RG ejemplo por colores.	36
Tabla 4.1. Operación lógica XOR.....	47
Tabla 5.1. Codewords para cada valor de CFI.	57
Tabla 5.2. Secuencias ortogonales para PHICH.	59
Tabla 5.3. Número de secuencias ortogonales PHICH multiplexadas en TDD para cada subtrama.	60
Tabla 5.4. Número de REG permitidos para cada ancho de banda y número de grupo PHICH.....	61
Tabla 5.5. Niveles de agregación en PDCCH.....	62
Tabla 6.1. Secuencias ortogonales de dispersión temporal.....	75
Tabla 6.2. Factores de dispersión para códigos de dispersión temporal para datos y RS en los formatos PUCCH 1/1a/1b con CPs normales o extendidos.....	75
Tabla 6.3. Asignación de índices de recursos RB en PUCCH formato 1/1a/1b.....	78
Tabla 6.4. Código para 2 bits ACK/NACK/RI.	81
Tabla 6.5. Selección de máscara CRC para transmisión en UE.	82
Tabla 6.6. Formatos de preámbulo para FDD.	91
Tabla 7.1. Mensajes RRC, NAS y EMS durante Attaching [27].	99
Tabla 7.2. Signalling Radio Bearers [49]	101
Tabla 7.3. Data Radio Bearers. [49]	102
Tabla 8.1. Antenas en función del CRC del MIB.	107
Tabla 9.1. Subtrama que transporta el preámbulo en función del valor ConfigIndex.	121
Tabla 9.2. Duraciones temporales de los formatos de preámbulo.	122
Tabla 10.1. MCS para PUSCH en función del valor CQI [61]	127
Tabla 11.1. LCID en DL-SCH.....	137
Tabla 11.2. LCID en UL-SCH.....	137
Tabla 11.3. Tamaños del buffer usuario.	141
Tabla 11.4. Ratio de potencia en función de PH.....	147
Tabla 12.1. Número de bits para PMI codebooks en función de los modos de transmisión.	149
Tabla 12.2. Número e índice de Precoding Matrix en función del número de bits.	150
Tabla 12.3. Precoding Matrix codebook para 6 bits.	150
Tabla 12.4. Asociación de bits con codebook para 6 bits.....	151
Tabla 12.5. MCS para CQI 1.	152
Tabla 12.6. MCS para CQI 2.	152
Tabla 12.7. Mapeo de ConfigIndexCQI/PMI a Npd y NOFFSET – CQI para multiplexación FDD.....	155
Tabla 12.8. Mapeo de ConfigIndexCQI/PMI a Npd y NOFFSET – CQI para multiplexación TDD.....	155
Tabla 12.9. Mapeo de ConfigIndexRI a Npd y NOFFSET – CQI.	156
Tabla 12.10. Transmisión de PMI en función de los Modos de cqi-ReportModeAperiodic.....	156
Tabla 12.11. Información del formato PUCCH [36.213-10.1.1].	158
Tabla 12.12. Mensaje d(0) para cada formato UCI.....	159
Tabla 12.13. Secuencias ortogonales PUCCH para índices de secuencia con factor de dispersión 3.	160
Tabla 12.14. Secuencias ortogonales PUCCH para índices de secuencia con factor de dispersión 4.	160
Tabla 12.15. Parámetros de un DCI formato 0.	162
Tabla 12.16. Hopping en frecuencia en función de N_ULhop si el valor de Hopping flag es cero.	162
Tabla 12.17. Desplazamientos cíclicos según el parámetro Cyclic Shift.	163
Tabla 12.18. Parámetros DCI formato 1 con C-RNTI.....	165
Tabla 12.19. Parámetros DCI formato 1A con C-RNTI.	166
Tabla 12.20. Parámetros DCI formato 1A con RA-RNTI, P-RNTI y SI-RNTI.....	167
Tabla 12.21. Parámetros DCI formato 1B con C-RNTI.	168
Tabla 12.22. Parámetros DCI formato 1B con RA-RNTI, P-RNTI y SI-RNTI.....	169
Tabla 12.23. Parámetros DCI formato 1B M-RNTI.	169
Tabla 12.24. Ubicación de los recursos según el formato DCI.	170
Tabla 12.25. Tamaño de los Resource Block Groups para cada ancho de banda.	170
Tabla 12.26. Subtramas de Paging Occasion en FDD.	175



<i>Tabla 12.27. Subtramas de Paging Occasion en TDD (todas las configuraciones DL/UL).....</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 13.1. Variaciones en la estructura de la trama 5G en función del espacio entre subportadoras.....</i>	<i>177</i>
<i>Tabla 13.2. Resumen de los formatos DCI en 5G.....</i>	<i>182</i>
<i>Tabla 13.3. Tamaño de los formatos PUCCH en 5G.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 13.4. Resumen de diferencias entre LTE y 5G.....</i>	<i>185</i>



Lista de figuras

Figura 1.1 La evolución de la demanda de conectividad [3].	3
Figura 1.2. Tecnologías del estándar 1G [4].	3
Figura 1.3. Representación de las diferentes versiones del estándar 2G [4].	4
Figura 1.4. Diferentes tecnologías 3G [4].	5
Figura 1.5. Esquema simplificado de la arquitectura UMTS [6].	6
Figura 1.6. Arquitectura general de LTE [9].	9
Figura 1.7. Características de las Categorías 1 a 5 de LTE [10].	10
Figura 1.6. Esquema de las interfaces S1 y X2 [11].	11
Figura 1.7. Esquema gráfico de la evolución de las necesidades de conectividad demandados por los usuarios [3].	13
Figura 1.8. Nuevos escenarios de uso del 5G [13].	14
Figura 2.1. Conversión serie a paralelo en OFDM [16].	19
Figura 2.2. Diagramas de bloques en OFDM: (a) transmisor, (b) receptor [17].	19
Figura 2.3. Pérdida de ortogonalidad entre subportadoras OFDM [17].	22
Figura 2.4. Sensibilidad OFDM frente a offsets en sincronización [17].	24
Figura 2.5. Ejemplo de ubicación de recursos en un sistema OFDMA/TDMA [15].	25
Figura 2.6. OFDMA vs SC-FDMA [22].	26
Figura 2.7. Generación en el dominio del tiempo de una señal SC-FDMA [17].	26
Figura 2.8. Transmisión distribuida mediante subportadoras con datos L-equiespaciadas [17].	27
Figura 2.9. Diagrama de bloques para el procesamiento de una señal SC-FDMA generada en frecuencia [7].	28
Figura 2.10. Diagrama de bloques para modular y demodular Downlink y Uplink en LTE [24].	30
Figura 3.1. Estructura temporal a nivel de trama en LTE [25].	31
Figura 3.2 Matriz de dos RBs contiguos en el tiempo [26].	32
Figura 3.3 Esquema de FDD frente TDD en LTE [27].	34
Figura 3.4 RG Downlink de ejemplo, (a) TDD (b) FDD [28].	36
Figura 4.1 Turbocódigo en LTE con $m=6$, $n=3$ y $k=1$ [31].	41
Figura 4.2 Interleaving y Rate Matching en LTE [32].	42
Figura 4.3 Diagrama de bloques para generar una Secuencia Gold [33].	47
Figura 5.1 Subportadoras OFDM de P-SS en Downlink [34].	50
Figura 5.2 Ubicación de PSS en los RGs de ejemplo: (a) Configuración FDD (b) Configuración TDD.	51
Figura 5.3 Esquema de la generación de la señal SSS [35].	52
Figura 5.4 Ubicación de SSS en los RGs de ejemplo: (a) Configuración FDD (b) Configuración TDD.	53
Figura 5.5 REs destinados para señales de referencia específicas de celda en un RB, para el caso de transmisión mediante 2 puertos de antena [36].	54
Figura 5.6 Ubicación del PBCH en el RG de ejemplo.	56
Figura 5.7 Tamaño del PDCCH en función del valor del CFI.	57
Figura 5.8 Posiciones de los REGs que conforman el PCFICH en el RG [38].	58
Figura 5.9 Codificación HARQ en LTE [17].	59
Figura 5.10 Estructura DCI formato 1A [40].	62
Figura 5.11 Scrambling RNTI con el CRC de un DCI [41].	63
Figura 5.12 Codificación del canal PDCCH [42].	64
Figura 5.13. Algoritmo RM basado en un Circular Buffer [17].	66
Figura 6.1. Ejemplo de slots para las alternativas de (a) un LB DM-RS por slot y (b) dos SBs DM-RS por slot [45].	68
Figura 6.2. Estructura para transmisión de señales de referencia en SC-FDMA [17].	69
Figura 6.3. Estructura de símbolos SRS con $RPF = 2$ [17].	71
Figura 6.4. Mapeo de los formatos PUCCH sobre sus regiones o RBs [26].	72
Figura 6.5. Estructura del canal para CQI, formatos PUCCH 2, 2a y 2b con un CP normal [46].	73
Figura 6.6. Estructura ACK/NACK, los UE son multiplexados mediante diferentes desviaciones cíclicas y dispersiones temporales [17].	74
Figura 6.7. Un UE puede no transmitir SRS y PUCCH o PUSCH de manera simultánea [26].	76
Figura 6.8. Estructura de PUCCH acortado para SRS y HARQ simultáneos [17].	76
Figura 6.9. Mapeo de la constelación para ACK/NACK y SR para los formatos 1/1a/1b [23].	80
Figura 6.10 Multiplexación de la señalización de control con los datos UL-SCH [17].	80
Figura 6.11 Modos de salto en PUSCH [26].	84
Figura 6.12 Procesamiento del canal PUSCH [17].	85



Figura 6.13 Proceso Random Access basado en contención [17].	87
Figura 6.14 Ventana temporal del RAR [17].	88
Figura 6.15 Timing de la transmisión del mensaje L2/L3 [17].	88
Figura 6.16 RAP libre de contención [17].	89
Figura 6.17 Multiplexación del PRACH con PUSCH y PUCCH [43].	90
Figura 6.18 Preámbulo PRACH recibido en el receptor [43].	90
Figura 6.19 Estructura de un transmisor de preámbulo PRACH [49].	92
Figura 6.20 Preámbulo PRACH híbrido tiempo/frecuencia[49].	92
Figura 7.1 Interacción entre capas LTE [50].	94
Figura 7.2 Estados RRC [53].	97
Figura 7.3 Diagrama Downlink de las capas en LTE [54].	98
Figura 7.4 Diagrama Uplink de las capas en LTE [54].	98
Figura 7.5 Bearers en LTE [55].	99
Figura 7.6 Radio Bearers en LTE [57].	100
Figura 8.1 Correlación PSS (a), Correlación SSS (b).	105
Figura 8.2 Símbolos OFDM del canal PBCH.	106
Figura 8.3 Resource Element Groups destinados al canal PCFICH [38].	108
Figura 8.4 Grid recuperado en interfaz visual Matlab.	109
Figura 8.5 Scrambling RNTI con el CRC de un DCI [41].	110
Figura 9.1 Diagrama de mensajes para attaching a celda entre UE y eNB [58].	119
Figura 9.2 Ejemplo de SIB2 en forma de árbol [37].	120
Figura 9.3 Ubicación del preámbulo RACH [37].	122
Figura 9.4 Ejemplo de respuesta al preámbulo [37].	123
Figura 9.5 Ejemplo de UL grant en respuesta al preámbulo [58].	124
Figura 10.1 Diagrama de mensajes entre entidades que componen la red LTE [60].	125
Figura 10.2 Captura de paquetes LTE en Wireshark mostrando proceso de attaching a celda.	126
Figura 10.3 Paquete con mensaje RRC Connection Request.	128
Figura 10.4 Paquete con mensaje RRC Connection Setup.	131
Figura 10.5 Paquete con mensaje RRC Connection Setup Complete.	135
Figura 12.1 Parámetros del mensaje RRC Connection Setup para CSI [67].	154
Figura 12.2. Generación del PUCCH formato 1 [47].	160
Figura 12.3. Codificación y modulación del canal PUSCH [17].	164
Figura 12.4. Ubicación de los RBG para RAType 0 [17].	171
Figura 12.5. Ubicación de los RBG para RAType 1 [17].	171
Figura 12.6. Codificación de los datos en UCI formato 2 [17].	172
Figura 12.7. Rate Matching de los bits codificados en UCI formato 2 [17].	173
Figura 12.8. Ubicación en el RG del UCI formato 2 [17].	173
Figura 13.1. Canales y señales de la capa física y MAC en 5G [70].	176
Figura 13.2. Comparativa de la directividad del diagrama de radiación [72].	178
Figura 13.3. Haz barriendo 360° en busca de un UE [72].	178
Figura 13.4. Cuatro posibles casos de conectividad entre el UE y gNB en 5G [72].	179
Figura 13.5. Ubicación de los SSB en 5G [73].	180
Figura 13.6. Reparto de los SSB en diferentes beams [72].	181
Figura 13.7. Dimensiones de las señales de sincronización y el PBCH en 5G [74].	181
Figura 13.8. Proceso de codificación del canal PDSCH en 5G [75].	183

Acrónimos

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G-NR	<i>Fifth Generation New Radio</i>
ACK	<i>Acknowledgement</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AGC	<i>Automatic Gain Control</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
AMC	<i>Adaptative Modulation and Coding</i>
AP	<i>Access Point</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>
BE	<i>Best-Effort / Best-Effort Period</i>
BECP	<i>Best-Effort Controlled Phase</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSR	<i>Buffer Status Report</i>
BSS	<i>Business Support System</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CB	<i>Circular Buffers</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCE	<i>Control Channel Elements</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CFI	<i>Control Format Indicator</i>
CFO	<i>Carrier Frequency Offset</i>
CFP	<i>Contention-Free Period</i>
CN	<i>Core Network</i>
COTS	<i>Commercial Off-The-Shelf</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSI	<i>Channel State Indicator</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
CTS	<i>Clear-To-Send</i>
DC-HSDPA	<i>Dual Carrier-HSDPA</i>



DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DCI	<i>Downlink Control Indicator</i>
DL	<i>Downlink</i>
DM-RS	<i>Demodulation Reference Signals</i>
E-UTRAN	<i>Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
EDGE	<i>Enhanced Data for GSM Evolution</i>
EMBB	<i>Enhanced Mobile BroadBand</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
FA	<i>Factory Automation</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FEC	<i>Forward Error Correction Codes</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIFO	<i>First In, First Out</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shiftkeying</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRB	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Resposere Quest</i>
HDL	<i>Hardware Description Language</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
IFFT	<i>Inverse Fourier Transform</i>
IQ	<i>In-phase and Quadrature</i>
IS-95	<i>Interim Standard 95</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>
LCID	<i>Logical Channel ID</i>



LFSR	<i>Linear Feedback Shift Register</i>
LO	<i>Local Oscillator</i>
LoS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution - Advanced</i>
MAC	<i>Medium Access Layer</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MBSFN	<i>Multimedia Broadcast Single Frequency Networks</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIB	<i>Master Information Block</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
mMTC	<i>Massive Machine-Type Communications</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User MIMO</i>
NAS	<i>Non-Access Stratum</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
Ng	<i>Number Group</i>
NLoS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
NSS	<i>Network Sub-System</i>
OAI	<i>Open Archives Initiative</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OMNeT++	<i>Objective Modular Network Testbed in C++</i>
OSS	<i>Operational Support Systems</i>
PA	<i>Process Automation</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDNGW	<i>PDN Gateway</i>
PDP	<i>Power Delay Profile</i>
PDU	<i>Power Distributor Unit</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PH	<i>Power Headroom</i>
PHY	<i>Physical</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PLR	<i>Packet Loss Rate</i>



PMI	<i>Precoding Matrix Indicator</i>
PN	<i>Pseudo-Noise</i>
PPS	<i>Pulse Per Second</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAP	<i>Random Access Procedure</i>
RAR	<i>Random Access Response</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RBG	<i>Resource Block Group</i>
REG	<i>Resource Element Group</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RI	<i>Rank Indicator</i>
RIFS	<i>Reduced Interframe Space</i>
RIV	<i>Resource Indication Value</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RM	<i>Resource Management</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RNS	<i>Radio Network Subsystem</i>
RNTI	<i>Radio Network Temporary Identifier</i>
ROHC	<i>Robust Header Compression</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RS	<i>Reference Signal</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RT	<i>Real-Time</i>
RTx	<i>Retransmission</i>
RV	<i>Redundancy Version</i>
Rx	<i>Receiver</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>



SFN	<i>System Frame Number</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
SHARP	<i>Synchronous and Hybrid Architecture for Real-time Performance</i>
SIB	<i>System Information Block</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SR	<i>Scheduling Request</i>
SRS	<i>Sounding Reference Signals</i>
SSS	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
STR	<i>Symbol Timing Recovery</i>
TAC	<i>Timing Advance Command</i>
TAS	<i>Time-Aware Shaper</i>
TCXO	<i>Temperature Controlled Crystal Oscillator</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TM	<i>Transparent Mode</i>
TP	<i>Transmit Power</i>
TSN	<i>Time Sensitive Networking</i>
Tx	<i>Transmitter</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UM	<i>Unacknowledge Mode</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
VHDL	<i>Very High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
W-CDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
w-SHARP	<i>Wireless SHARP</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WirelessHP	<i>Wireless High-Performance</i>
WPA2	<i>Wi-Fi Protected Access 2</i>

Notación



\cdot	<i>Producto escalar</i>
$*$	<i>Convolución</i>
$ \cdot $	<i>Valor absoluto</i>
$[\cdot]$	<i>Floor</i>
$\lceil \cdot \rceil$	<i>Ceil</i>
f	<i>Frecuencia</i>
f_c	<i>Frecuencia de portadora</i>
t	<i>Tiempo</i>
T	<i>Periodo de muestreo</i>
δ	<i>Delta de Dirac</i>
$\delta_{m,n}$	<i>Delta de Kronecker</i>
\mathcal{N}	<i>Distribución Gaussiana</i>
σ	<i>Desviación estándar</i>
$\bar{\tau}$	<i>Dispersión media de retardo</i>

1.1. Motivación

La digitalización de procesos en el contexto de la industria 4.0. producirá un nivel de automatización nunca visto, lo que resultará en instalaciones industriales repletas de un enorme número de dispositivos heterogéneos interconectados que pueden ser controlados, actualizados y configurados automáticamente a través de una red ubicua [1]. Esta revolución de la red reduciría drásticamente los costos de mantenimiento, instalación y operación de las instalaciones de la industria gracias a la sustitución de las conexiones cableadas por la conectividad inalámbrica. Las principales ventajas de las redes inalámbricas en comparación con las cableadas son los menores costos de instalación, la mayor escalabilidad y flexibilidad, y el libre movimiento de los nodos.

Las redes inalámbricas conllevan sin embargo una serie de retos, ya que las redes industriales precisan de requisitos estrictos: comportamiento previsible, alta fiabilidad, baja latencia acotada, estrecha sincronización temporal, manejo de un enorme número de nodos y transferencia de datos de alta seguridad. La mayoría de estos desafíos se resuelven en el dominio cableado gracias a la tecnología TSN (Time-Sensitive Networking) [2], sin embargo desde el punto de vista inalámbrico, varios desafíos siguen bloqueando el despliegue masivo de la conectividad inalámbrica en las fábricas. Estos desafíos se derivan de dos aspectos importantes en las comunicaciones inalámbricas, el comportamiento poco fiable e impredecible de la propagación inalámbrica, y el diseño histórico de los sistemas inalámbricos.

En primer lugar, la naturaleza de la propagación inalámbrica, que es especialmente notable en los escenarios industriales, se enfrenta a la fiabilidad requerida por la mayoría de las aplicaciones industriales, además, el medio compartido puede producir interferencias significativas entre los diferentes sistemas inalámbricos que comprometen aún más la fiabilidad. En segundo lugar, los sistemas inalámbricos se han diseñado ampliamente para el mercado de consumo, que se caracteriza por la transmisión de paquetes de datos de gran tamaño con pocos requisitos de latencia y fiabilidad. Por el contrario, las aplicaciones industriales se caracterizan por transmitir pocos bytes con estrictas limitaciones de latencia y fiabilidad. Por consiguiente, la mayoría de los sistemas inalámbricos no están preparados para su despliegue en escenarios industriales.

El principal objetivo de este trabajo es el de adquirir los conocimientos del estándar LTE que permitan una futura implementación sobre FPGA (Field Programmable Gate Array). Para ello se ha complementado el estudio y la documentación de los conocimientos adquiridos con la implementación de un receptor LTE programado en Matlab, ayudándose de la herramienta LTE Toolbox. Además, se ha empleado el proyecto libre de OpenAirInterface como entorno de intercambio de paquetes LTE capturando dichos mensajes y analizándolos con el programa Wireshark.



1.2. Estado del arte

El desarrollo de las redes móviles habitualmente se expresa como sucesivas generaciones ((1G, 2G, 3G, 4G, 5G) que no han dejado de crecer de la mano, en un principio, de las necesidades de la telefonía móvil y posteriormente de las necesidades de conectividad para una demanda que abarca todos los entornos individuales o colectivos.

De este modo nace, ya en los años 70 y sobre todo los 80, una tecnología que tuvo como objetivo satisfacer la necesidad de tener un medio de comunicaciones inalámbrico confiable capaz de transmitir voz, en un contexto de movilidad, desde un punto a otro y que dio lugar a la primera generación de telefonía móvil basada en una tecnología analógica de voz y dirigida exclusivamente a hacer llamadas tradicionales.

Pero, tras este primer paso, las necesidades empezaron a cambiar desde el punto de vista de la demanda y de la tecnología, introduciendo la digitalización del servicio en la generación 2G (GSM, GPRS, EDGE).

Ya en esta etapa se es consciente de que la voz no es el principal, o al menos no el único objetivo, de la conectividad inalámbrica, pasando los datos a ocupar el objetivo primordial de las sucesivas generaciones.

Con 3G se produce un cambio radical del concepto original, mediante una implementación basada en el estándar UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) basado en tecnología W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) que ya permite una mayor velocidad que las tecnología 2G, proporcionando una mayor eficiencia espectral y permitiendo servicios de voz y, sobre todo, de datos dejando entrever un campo de posibilidades amplísimo.

Nace aquí el 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Este proyecto cubre las tecnologías de redes de telecomunicaciones móviles, incluido el 5G. Sus especificaciones abarcan todas las áreas del sistema, incluidos el acceso radio, la red de transporte principal y las capacidades de servicio. También incluye estudios para el acceso no radio a la red central y detalles de interoperabilidad con redes no licenciadas como la Wi-Fi.

Este hecho va a producir una rápida evolución de la demanda, con lo que queda claro que es preciso implementar mayores capacidades de transmisión y recepción, apareciendo así las generaciones 4G, hoy ampliamente distribuida y la red 5G que está teniendo en la actualidad sus inicios de desarrollo, especialmente estimulada por las necesidades de la industria, la energía, el transporte, la salud o el ocio, por poner los ejemplos tal vez mas conocidos y para destacar, a grandes rasgos, cómo ha evolucionado la demanda y se ha generado esta evolución desde una, ya primitiva, necesidad de comunicación por voz y sin cables hasta el momento en el que nos encontramos en la actualidad.

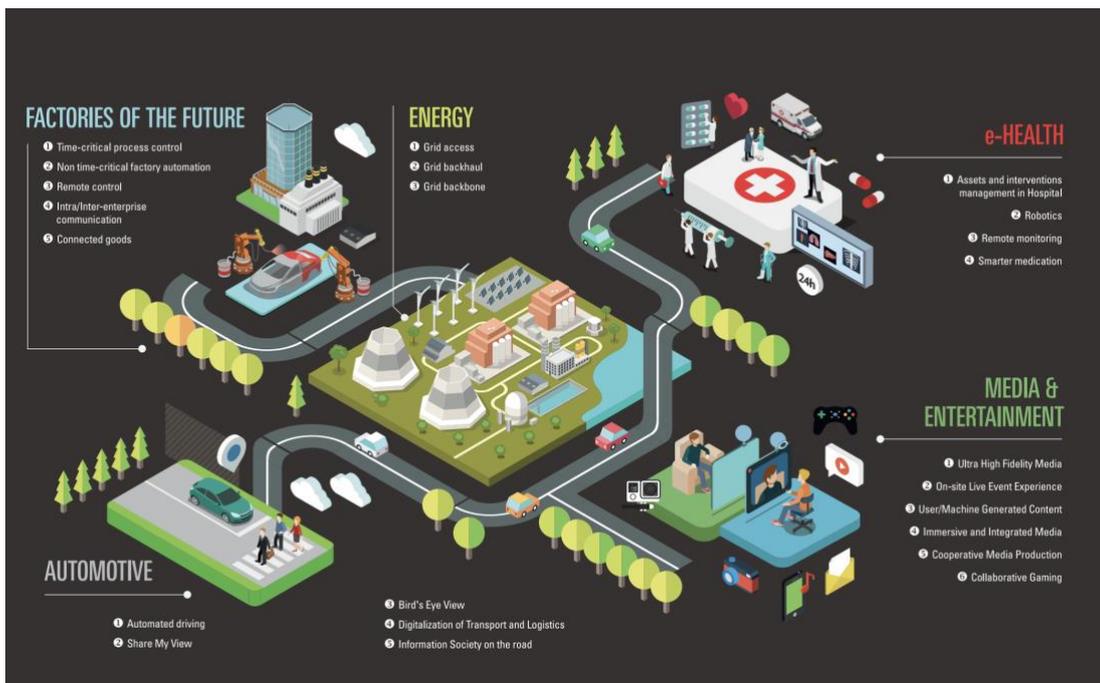


Figura 1.1 La evolución de la demanda de conectividad [3].

1.2.1. La primera generación (1G)

Los sistemas de primera generación, lanzados en la década de 1980 bajo el símbolo 1G, usaban una transmisión analógica y solo podían manejar el tráfico de voz. La calidad de comunicación que ofrece la primera generación de teléfonos celulares, equipos voluminosos, tenía limitaciones obvias relacionadas con el tipo de señal, como la mala calidad de audio y las interrupciones frecuentes.

Como tecnología incipiente, de interés histórico, sin embargo, es de destacar la escasa necesidad de elementos de red para su puesta en marcha. Las tecnologías usadas por el estándar 1G se representan en la figura 1.2:

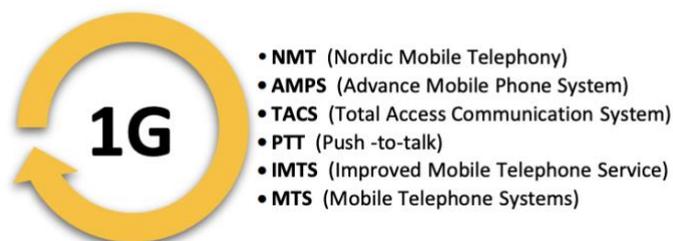


Figura 1.2. Tecnologías del estándar 1G [4].

1.2.2. La segunda generación (2G)



La segunda generación (2G) se basa ya en la tecnología digital que se desarrolló a fines de la década de 1980. Estos sistemas usan tecnología digital para el enlace y la señal de voz, proporcionando una mejor calidad y una mayor capacidad con un menor costo para el usuario.

A continuación, se enumeran las características del GSM (Global System for Mobile Communications) que explican su popularidad y su amplia aceptación:

- Mejora de la eficiencia espectral.
- Roaming Internacional.
- Conjuntos móviles y estaciones base de bajo costo.
- Voz de alta calidad.
- Compatibilidad con ISDN (Integrated Services Digital Network) y otros servicios de las compañías telefónicas.
- Soporte para nuevos servicios.



Figura 1.3. Representación de las diferentes versiones del estándar 2G [4].

1.2.2.1. La red GSM.

La función principal de la red GSM es permitir las comunicaciones entre suscriptores móviles (GSM) y suscriptores de la red telefónica conmutada PSTN (Public Switched Telephone Network). Se distingue por un acceso específico llamado enlace de radio.

La red GSM se puede dividir en tres subconjuntos:

- El subsistema de radio -BSS (Business Support System)
- El subsistema de enrutamiento -NSS (Network Sub-System)
- El subsistema de operación y mantenimiento -OSS (Operational Support Systems)

1.2.2.2. La red GPRS

GPRS (General Packet Radio Service) es una tecnología de transporte de datos en modo paquete. Esta evolución del estándar (la llamada 2.5G) se realizó para evitar cambiar todo el equipo de la red de infraestructura GSM existente, agregando dos nuevos equipos, el GGSN



(Gateway GPRS Support Node) y el SGSN (Serving GPRS Support Node) para ofrecer velocidades de transmisión de hasta 171 kb/s en lugar de 14,4 kb/s en modo circuito.

En el caso del modo circuito, el recurso de radio está permanentemente inmovilizado para permitir el tráfico continuo de datos. En el caso del modo paquete, el recurso de radio se inmoviliza solo cuando se transmiten datos y el canal vuelve a estar libre en ausencia de tráfico.

1.2.2.3. La red EDGE

EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) solo se refiere a la circulación de datos, la voz continúa en tránsito en la red GSM. Es una evolución simple de la tecnología GSM/GPRS, siendo su particularidad la adaptación del esquema de modulación, dependiendo de la calidad del enlace.

Para un enlace de buena calidad, EDGE utiliza la modulación 8-PSK (Eight Phase Shift Keying). Esta técnica de modulación ofrece una mayor eficiencia espectral que la modulación utilizada por GSM y GPRS (GMSK - Gaussian Minimum Shiftkeying) y nos permite obtener tasas de bits promedio de 130 kb/s en recepción y 60 kb/s en transmisión (3 veces mayor que el de GPRS).

1.2.3. La tercera generación (3G)

La tercera generación de redes móviles (3G) reúne a dos familias de tecnologías que han tenido éxito comercial: el UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), originario de GSM y ampliamente implementado en todo el mundo, y CDMA (Code Division Multiple Access) originario de IS-95 (Interim Standard 95) y sus variantes que se desplegó principalmente en Asia y América del Norte.

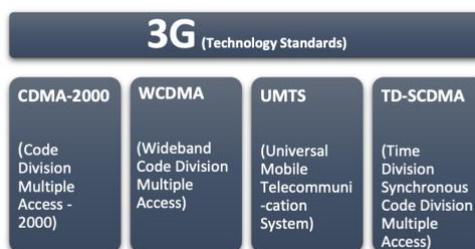


Figura 1.4. Diferentes tecnologías 3G [4].

Las interfaces de radio de estas dos familias se basan en características técnicas similares. Nos centraremos, en este repaso del estándar, en UMTS porque es esta familia de tecnologías que dará a luz posteriormente a LTE.

1.2.3.1. La red UMTS

Al integrar originalmente servicios multimedia de alta velocidad (2 Mbit/s), el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) constituye la evolución natural de los sistemas de comunicación entre móviles [5].

Las bandas de frecuencia asignadas a UMTS son de alrededor de 2 GHz con un ancho de banda de 230 MHz. Las tasas ofrecidas en una estación están directamente relacionadas con el tamaño de una celda.

- De 144 a 384 kb/s en zonas rurales para velocidades de desplazamiento inferiores a 500 km/s , muy relacionada con el transporte de alta velocidad como el AVE o el TGV francés.
- De 384 a 512 kb/s en zonas urbanas para velocidades de desplazamiento inferiores a 120 km/s.
- Hasta 2 Mb/s dentro de los 10 km de la base de radio.

UMTS se basa en la técnica de acceso múltiple WCDMA (Wideband CDMA) que consiste en explotar una banda de frecuencia más amplia para enviar una gran cantidad de datos en paquetes.

1.2.3.2. Arquitectura de red general

UMTS tiene dos partes principales: la red de acceso llamada UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) y el núcleo de red o Core Network, abreviadamente CN. La arquitectura se presenta, esquemáticamente, como se muestra en la Figura 1.5.

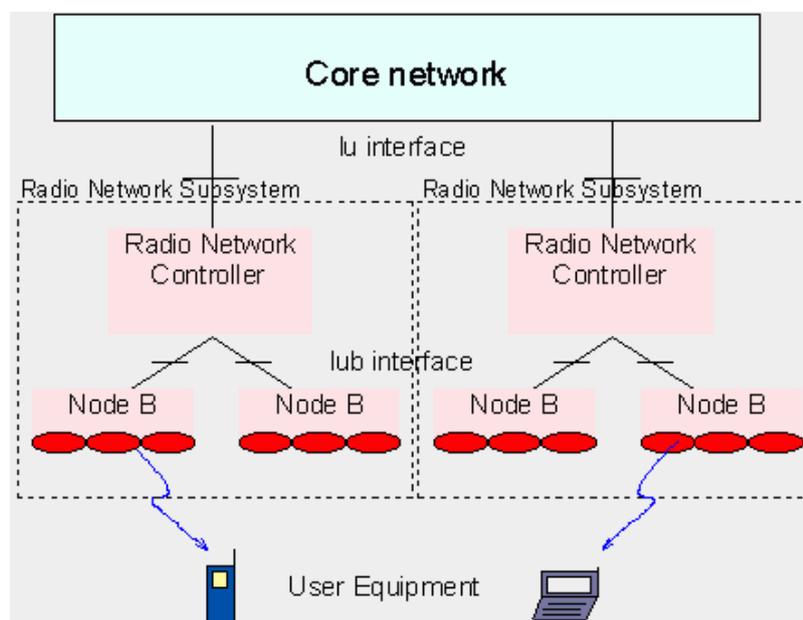


Figura 1.5. Esquema simplificado de la arquitectura UMTS [6].



La red de acceso es la red que soporta el control y la gestión de los recursos de radio, permite el intercambio de información entre el terminal móvil y la red central. La UTRAN está compuesta por el RNC (Radio Network Controller) y el Nodo B correspondientes, respectivamente, al BSC (Base Station Controller) y BTS (Base Transceiver Station) de la red GSM. Estas dos entidades forman el RNS (Radio Network Subsystem).

- a) El nodo B: Realiza funciones similares a las de la BTS de las redes GSM y GPRS. Gestiona principalmente la capa física de la interfaz aérea (codificación de canal, intercalado, adaptación de velocidad y difusión).
- b) RNC (Radio Network Controller): El papel principal del RNC es enrutar las comunicaciones entre el nodo B y la red central de UMTS. Funciona en las capas 2 y 3 del modelo OSI (control de potencia, asignación de código). Es el punto de acceso para todos los servicios con respecto a la red central.

La red central CN incluye todos los equipos que proporcionan funciones como control de llamadas, control de seguridad y gestión de interfaz con redes externas. Estos se dividen en dos categorías: la de redes de circuito (ISDN) y la de redes de paquetes (red de Internet).

En lo referente a la Calidad de Servicio (QoS- Quality of Service), UMTS permite el acceso a Internet con la misma funcionalidad que un enlace ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), añadiendo la movilidad. Para ello, implementa cuatro clases de tráfico divididas en dos tipos de servicio.

- Los llamados servicios en tiempo real:
 - La clase <<conversational>> para transmisiones de voz, video y VoIP.
 - La clase <<streaming>> para transmisiones de audio y video.
- Servicios <<best effort>>:
 - La clase <<interactive>> para navegar en la Web, sin velocidad ni retraso garantizados.
 - La clase <<background>> para transferencias de datos (mensajería, descarga, transferencia de archivos ...).

A pesar de todas las esperanzas puestas en este nuevo estándar de red, UMTS presenta varias desventajas de las cuales principalmente [10]:

- Alto precio de licencia.
- Esfuerzo de desarrollo significativo a ser proporcionado por los fabricantes de equipos.
- Esfuerzo significativo por parte de los operadores.
- Cambio de equipo de usuario.
- Competencia con WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) que ofrece 30 Mbits/s.

1.2.3.3. High-Speed Packet Access (HSPA)

La principal innovación de HSPA [7] se refiere a la transición de la conmutación de circuitos en la interfaz de radio a la conmutación de paquetes. La asignación dinámica de recursos se



lleva a cabo mediante la función de programación o programación de acuerdo con la calidad instantánea del canal de radio de cada UE (User Equipment). El rendimiento instantáneo se incrementa mediante el uso de modulación en un mayor número de estados.

Se introduce 16-QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) para el enlace descendente. Para el enlace ascendente se introdujo una modulación QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying). Para reducir la latencia del sistema en caso de pérdida de paquetes, se define un nuevo mecanismo para la retransmisión rápida de paquetes erróneos, llamado HARQ (Hybrid Automatic Responser Quest), entre la UE y la estación base.

Estos desarrollos ofrecen a los usuarios velocidades máximas de 14,4 Mbit / s en sentido descendente y 5,8 Mbits / s en sentido ascendente, así como una latencia reducida.

HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) [8] o 3.5G mejora las tasas de capacidad gracias a la introducción de nuevas técnicas. En sentido descendente, ahora se admite la modulación 64-QAM, al igual que la modulación en sentido ascendente 16-QAM. Además, una célula puede transmitir datos a un usuario en dos operadores simultáneamente en el enlace descendente, utilizando la funcionalidad DC-HSDPA (Dual Carrier-HSDPA). En consecuencia, los caudales suministrados al usuario se duplican potencialmente.

Por último, HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access), también conocido como la generación 3.75G, es una evolución de los anteriores que mejora la velocidad del enlace ascendente hasta 5,8 Mbps disminuyendo el retraso entre el enlace ascendente y descendente.

1.2.4. La cuarta generación (4G/LTE)

A principios de la década de 2000, varios operadores móviles y fabricantes de equipos de telecomunicaciones y las organizaciones se unieron para desarrollar una red móvil 4G para la cuarta generación basado en 3G. La principal ventaja de este nuevo estándar es permitir caudales que pueden aumentar hasta 1 Gigabit/s para receptores estáticos y 100 Mbit /s para usuarios móviles.

Por definición, 4G garantiza la convergencia de 3G con redes de comunicación por radio. basado en el protocolo IP. La conexión debería ser posible independientemente del modo de cobertura.

1.2.4.1. La red LTE

La idea y el proyecto para desarrollar la tecnología LTE (*Long Term Evolution*) están liderados por el organismo de estandarización 3GPP y tenía como objetivo redactar los estándares técnicos para la futura cuarta generación en comunicaciones móviles.

El propósito de esta tecnología es permitir la transferencia de datos a muy alta velocidad. En teoría, permite velocidades de alrededor de 50 Mb / s en enlace ascendente y 100 Mb / s en enlace descendiendo con un rango mayor y con un tiempo de baja latencia

LTE implica modificar el núcleo de la red y los transmisores de radio. El estándar LTE definido por el consorcio 3GPP1, se consideró por primera vez un estándar de tercera generación "3.9G", especificado en el contexto de las tecnologías 2000, porque en las



"versiones 8 y 9" de la estándar, no cumplían con todas las especificaciones técnicas impuestas para los estándares 4G por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

1.2.4.2. La red LTE-A

LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) se considera 4.5G o la puerta de enlace entre LTE (4G) y 5G. LTE-A fue presentado por 3GPP en la versión 10 (RL10) que vio la luz en el año 2012.

Por lo tanto, LTE Advanced es una evolución del estándar LTE con suplementos funcionales que permiten la introducción gradual de nuevas funciones en redes LTE preexistentes [5].

Esta tecnología fue creada para aumentar el LTE en términos de rendimiento, latencia, capacidad, cobertura y disminuir la interferencia, especialmente en la dirección ascendente. LTE-A es considerado por los concededores del campo de las telecomunicaciones como la verdadera cuarta generación; porque fue con los factores introducidos en este 3GPP RL10 que pudimos obtener un mejor rendimiento.

1.2.4.3. Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura general del sistema LTE se muestra en la Figura II-1, la red LTE se compone de dos entidades principales: la red de acceso de radio terrestre universal avanzada (E-UTRAN) que es la red de acceso de radio para la UE, y el núcleo de paquete avanzado (EPC), que es el núcleo de la red. La arquitectura de red central también se conoce como evolución de la arquitectura de servicio (SAE), y la combinación de E-UTRAN y EPC también se denomina sistema de paquetes avanzado (EPS) [14].

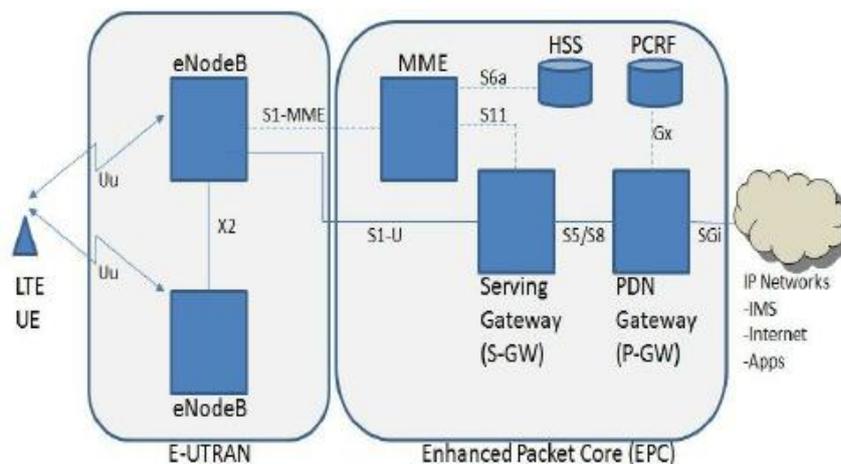


Figura 1.6. Arquitectura general de LTE [9].

En LTE, la UE se comunica con E-UTRAN y EPC utilizando los protocolos apropiados. La comunicación del plano de usuario finaliza en el nivel eNodeB y admite todos los protocolos del plano de usuario. En el lado del plano de control, la UE se comunica con el eNodeB y el MME a través de los protocolos RRC y NAS, respectivamente.



Para poder soportar diferentes capacidades de hardware, se definen diferentes equipos de usuario (UE). Las categorías se diferencian de acuerdo con la velocidad de datos máxima admitida en los datos tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. Además, el número máximo de capas de datos (o flujos de datos) difiere según la categoría de la UE.

Por ejemplo, la velocidad máxima para la Categoría 1 tanto para el enlace descendente como para el enlace ascendente es de aproximadamente 10 y 5 Mbps respectivamente.

Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

Figura 1.7. Características de las Categorías 1 a 5 de LTE [10]

Además, esta categoría no admite recibir más de un flujo de datos de enlace descendente simultáneamente. Además, UE categoría 5 puede soportar cuatro canales de datos de enlace descendente simultáneamente. Además, puede transmitir utilizando la modulación 64-QAM en el enlace ascendente.

La E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) designa la red de acceso LTE, tiene una arquitectura horizontal ya que se han eliminado los controladores de la estación base; Se compone de estaciones base llamadas eNodeB, antenas de radio y enlaces de transmisión (sistemas de fibra óptica, cobre o radioenlaces).

eNodeB desempeña el papel de NodeB y RNC (Radio Network Control) en redes UMTS, reduciendo el tiempo de acceso y simplificando la operación y el mantenimiento de la red.

El eNodeB es responsable de la transmisión y recepción de radio con la UE administrando las siguientes tareas:

- Gestión de recursos de radio (RRM- Radio Resource Management).
- Control de portadora de radio.
- Control de admisión por radio.
- Control de conexión en movilidad.
- Programación de la UE (UL y DL).
- Seguridad en el acceso al estrato (AS).
- Realizar mediciones como base para la programación y la gestión de la movilidad.



- Compresión del encabezado IP.
- Cifrado de datos del usuario.
- Enrutamiento de datos de usuario entre eNodeB y S-GW.
- Tratamiento de la paginación originada en MME.
- Procesamiento de mensajes de difusión originados desde el MME y el sistema operativo y
- Mantenimiento
- Selección del elemento MME en caso de que la UE no proporcione esta información.
- Procesamiento de mensajes PWS, incluidos ETWS y CMAS.

Los eNodeBs están conectados entre sí mediante una interfaz X2 (Figura 1.6).

- La interfaz X2: es una interfaz lógica. Se introduce para permitir que los eNodeBs intercambien información de señalización durante el traspaso o la señalización, sin involucrar a la red central.
- Los eNodeBs están conectados al corazón de la red a través de la interfaz S1.
- La interfaz S1: esta es la interfaz intermedia entre la red de acceso y la red central. Se puede dividir en dos interfaces básicas: la última consiste en S1-U (S1-User) entre el eNodeB y el SGW y S1-C (S1-Control) entre el eNodeB y el MME.

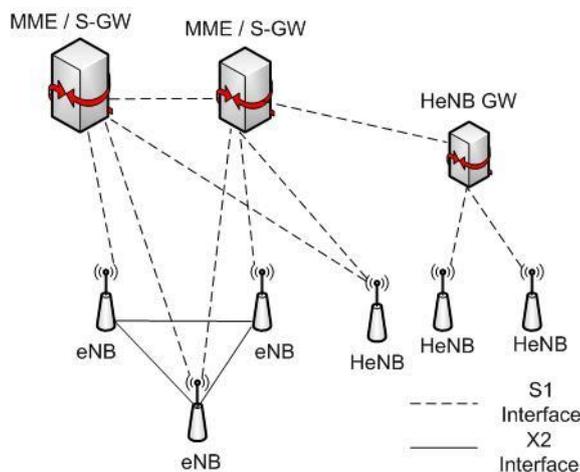


Figura 1.8. Esquema de las interfaces S1 y X2 [11].

1.2.4.4. Red central EPC (Evolved Packet Core)

La UE se comunica con el EPC a través de E-UTRAN. Cuando un UE está encendido, el EPC es responsable de autenticar y establecer la conexión inicial requerida para toda comunicación posterior. A diferencia de UMTS, LTE tiene una arquitectura totalmente IP, que solo admite datos con conmutación de paquetes (PS).

Las principales entidades del EPC como hemos visto en las figuras anteriores son: MME, S-GW, PDN-GW y HSS. Las funciones de estas entidades se describen a continuación:



- **Mobility Management Entity (MME)**, MME es el nodo de control primario para la red de acceso LTE / SAE. Maneja una serie de características como:
 - Monitoreo de UEs en modo inactivo (inactivo).
 - Activación / desactivación del Portador.
 - La elección de SGW para una UE.
 - Handover Intra-LTE que implica el alquiler del nodo de la red de acceso.
 - Interacción con el HSS para autenticar a un usuario en el archivo adjunto e implementación de restricciones de roaming.
 - Actúa como un despido para el Non-Access Stratum (NAS)
 - Proporciona identidades temporales para los UEs
 - SAE / MME actúa como un punto final para señalar el cifrado de protección NAS. Como parte de esto, también es responsable de administrar la clave de seguridad. Como resultado, MME es el punto donde se puede realizar la interceptación de señal legal.
 - El procedimiento de Paging
 - La interfaz S3 que termina en MME proporciona la función de plano de movilidad entre redes de acceso LTE y 2G / 3G
 - El MME / SAE también termina la interfaz S6 para el HSS para los UE itinerantes.
 - MME / SAE proporciona un nivel considerable de funcionalidad de control global.

- **Serving Gateway (SGW)**: la puerta de enlace de servicio SGW es un elemento del plan de datos dentro de LTE / SAE. Su objetivo principal es gestionar la movilidad del plan de usuario, también actúa como una frontera principal entre la red RadioAccess, RAN y la red central. El SGW también mantiene las rutas de datos entre los eNodeBs y las puertas de enlace PDN. De esta manera, el SGW forma una interfaz para la red de paquetes de datos a E-UTRAN. Además, cuando los UE viajan a las regiones atendidas por diferentes eNodeB, el SGW sirve como un ancla de movilidad para garantizar que se mantenga la ruta de datos.

- **PDN Gateway (PDGW)**: la puerta de enlace PDN LTE / SAE proporciona conectividad para la UE a redes de paquetes de datos externos, cumpliendo la función de entrada y salida para datos de la UE. La UE puede tener conectividad con más de una PGW para acceder a múltiples PDN.

- **Home Subscriber Server (HSS)**: con tecnología LTE, el HLR se reutiliza y se renombra como HSS. Por lo tanto, el HSS es un HLR avanzado que contiene información de suscripción para las redes GSM, GPRS, 3G, LTE e IMS. A diferencia de 2G y 3G, donde la interfaz para el HLR es compatible con el protocolo mundial SS7, MAP, la interfaz S6 se basa en el protocolo mundial IP, DIAMETER. El HSS es una base de datos que es utilizada simultáneamente por las redes 2G, 3G, LTE / SAE e IMS que pertenecen al mismo operador. Por lo tanto, admite los protocolos MAP (2G, 3G) y DIAMETER (LTE / SAE, IMS).



1.2.5. La quinta generación (5G)

Cuando la 4G no se ha terminado de desplegar aparece la próxima generación de redes móviles, la 5G promete un flujo diez veces mayor que 4G.

Investigadores de todo el mundo están estudiando posibles conceptos y tecnologías para la quinta generación de redes móviles. Muchos casos de uso se han resumido en diferentes libros blancos y revelan requisitos ambiciosos. Las tecnologías y conceptos actualmente bajo revisión para cumplir con estos requisitos son muy diversos [12].



Figura 1.9. Esquema gráfico de la evolución de las necesidades de conectividad demandados por los usuarios [3].

Indudablemente, es necesario comprender mejor las nuevas interfaces inalámbricas potenciales, que funcionan a frecuencias más altas que las correspondientes a las tecnologías de red actuales, que van desde 6 GHz a 100 GHz, así como tecnologías de antenas avanzadas como MIMO masivo y formación de haces.

Sobre todo, esta red futura se distinguirá por una innovación importante, con mil semiconductores, sus antenas pueden rastrear "cada dispositivo conectado a él hasta que salga de su perímetro, optimizando permanentemente la señal.

Implementado a partir de 2020, 5G proporcionará servicios personalizados al público en general y a las empresas por igual. 5G apunta a una amplia variedad de sectores, que no necesariamente tendrían ningún otro elemento común a esta tecnología, pero que son pilares importantes de una sociedad: energía, salud, medios, industria o transporte.



Figura 1.10. Nuevos escenarios de uso del 5G [13].

Tabla 1.1. Comparación entre las generaciones desde 1G hasta 5G [14].

Tecnología	1G	2G	3G	4G	5G
Periodo de desarrollo	1970-1984	1980-1999	1990-2002	2000-2010	2015-
Velocidad	2 Kbps	14-64 Kbps	2 Mbps	200 Mbps	>1 Gbps
Estándares	AMPS	GSM, GPRS, EDGE	WCDMA, CDMA-2000	Single Unified Standard	Single Unified Standard
Servicios	Telefonía móvil (voz)	Voz digital, mensajería	Audio de alta calidad, vídeo y datos	Acceso a información dinámico, IoT	Big Data, IoT con inteligencia artificial
Multiplexación	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA



1.3. Estructura del trabajo

Técnicas de acceso al medio y modulaciones

Se describen las técnicas de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) para la transmisión de datos Downlink y Uplink respectivamente, así como las características escogidas en LTE para solventar ciertos problemas además de mostrar los diagramas de bloques que conforman un transmisor y un receptor LTE.

Estructura temporal y frecuencial en LTE

Los símbolos IQ que transportan la información se multiplexan en tiempo y frecuencia, cada símbolo ocupa un determinado ancho de banda, así como una duración concreta. En este capítulo se explican las posibles configuraciones y características de la estructura temporal y frecuencial en LTE que condicionan la implementación de la capa física.

Técnicas de codificación

Los datos no se transmiten en crudo si no que reciben una serie de codificaciones y procesos con el fin de hacerlos más resilientes frente al ruido, asegurarse que sólo el usuario al que pertenecen los datos pueda decodificarlos etc. El proceso de codificación varía en función de los datos y el canal físico por el que se transmitan, en este capítulo sólo se detallan las técnicas desde un punto de vista general, indicándose en capítulos posteriores como y cuáles de dichas técnicas se emplean en cada situación.

Señales y canales físicos en Downlink

La señal Downlink que recibe el usuario esta compuesta por una serie de señales y canales físicos, estos son agrupaciones de símbolos IQ cuyos bits comparten un propósito (señalización, control, datos específicos de usuario...). El propósito de este capítulo es el de describir como se conforman dichas señales y canales físicos, así como resumir su cometido, ya que este será detallado en capítulos posteriores dónde se explica en detalle el proceso de decodificación y demodulación de una señal LTE en el equipo usuario.

Señales y canales físicos en Uplink

La señal Uplink que el usuario envía a la estación base no sólo utiliza una modulación diferente a la señal Downlink si no que presenta particularidades como por ejemplo:

- Limitación de potencia en el equipo usuario.
- La estación base recibe simultáneamente información de varios usuarios.
- No hay necesidad de transmitir información broadcast.

Este capítulo describe dichas señales y canales físicos además de introducir el proceso de "Random Access" mediante el cual el usuario accede por primera vez a la estación base y el cual está intrínsecamente ligado con el canal físico PRACH (Physical Random Access Channel).



Capas en LTE

Aunque el propósito de este documento son las capas física y MAC de LTE, es necesario tener una visión de conjunto para entender determinados procesos y objetivos de cara a implementar dichas capas. El objetivo de este capítulo es por tanto resumir capas superiores en LTE que permiten comprender la conexión y la estructura del protocolo.

Primera recepción Downlink

Esta etapa consiste en la detección, demodulación y decodificación de una serie consecutiva de tramas Downlink, mostrando el resultado obtenido en Matlab con el objetivo de obtener los parámetros que definen el tipo de transmisión y poder así preparar una respuesta Uplink. Las tramas Downlink empleadas han sido capturadas mediante una antena y provienen del operador de telefonía Vodafone.

Proceso Random Access

Este proceso consiste en la primera conexión que el usuario realiza con la estación base, establece una sincronización temporal con la estación base y transmite una firma indicando que desea conectarse a la red. En este capítulo se describe el proceso de la generación y ubicación de la firma o preámbulo que el usuario ha de enviar además de la respuesta de la estación base a dicha petición.

Proceso Radio Resource Control

El protocolo RRC conforma una capa a nivel IP entre el usuario y la estación base en la conexión LTE. Para poder establecer este protocolo es necesario el intercambio de una serie de mensajes de configuración. En este capítulo se describen dichos mensajes y los parámetros que contienen empleando capturas de una comunicación LTE real mediante el programa Wireshark.

Estructura MAC PDU

A nivel de capa MAC se añaden una serie de cabeceras y extensiones a los datos que conforman el mensaje a transmitir, estos parámetros informan al usuario de determinados aspectos relativos al mensaje que transportan como por ejemplo que tipo de datos son, o cual es la longitud del mensaje. En este capítulo se explican dichas cabeceras y extensiones además de incluir ejemplos de paquetes de datos reales capturados mediante el programa Wireshark.

Comunicación Post Attaching

Una vez establecido el protocolo de conexión entre el equipo usuario y la estación base ya es posible solicitar y enviar datos específicos de usuario (lo que se conoce comúnmente como “tener internet” en el dispositivo) además hay una serie de procesos no vistos hasta ahora como la información de la calidad del canal o el paginado.

Introducción a 5G

En este capítulo se abordarán las diferencias principales entre LTE y 5G.



Conclusiones y líneas futuras

Finalmente se comentan las conclusiones obtenidas mediante el desempeño de este trabajo, así como la continuidad de este en una futura tesis.



2

Técnicas de acceso al medio y modulaciones

2.1. OFDM

2.1.1. Definición

Escoger una modulación y una técnica de acceso al medio apropiadas para una comunicación móvil inalámbrica supone un aspecto crítico para alcanzar un buen rendimiento del sistema. Los canales radio tienden a ser dispersivos y variantes con el tiempo, por lo que las modulaciones multiportadora suelen ser la mejor apuesta.

En general, las técnicas multiportadora subdividen el ancho de banda del canal en un número de subcanales paralelos. Idealmente el ancho de cada subcanal está determinado para que no sean selectivos en frecuencia, es decir, que en dichos subcanales se suponga una atenuación plana para todas las frecuencias que los componen, esto supone una ventaja en el receptor ya que este puede compensar las atenuaciones de cada subcanal de manera individual.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing [15](OFDM) es un caso especial de transmisión multiportadora, en OFDM los subcanales paralelos se superponen los unos a los otros sin interferirse gracias a su ortogonalidad. Esto permite ahorrarse el uso de bandas de guardia (GPs) para separar los subcanales entre sí lo cual hace a OFDM una técnica espectral muy eficiente.

El espacio entre subcanales en OFDM es tal que el receptor puede separarlos sin problema, esto permite una implementación sencilla en el receptor, lo cual lo hace muy interesante en LTE para una transmisión Downlink (estación base transmitiendo, receptor móvil como receptor) ya que permite abaratar y simplificar (lo cual se traduce en menor consumo de potencia) el hardware en el receptor móvil.

Un flujo de datos a alta velocidad normalmente plantea un problema de interferencia entre símbolos (ISI), esto es debido a que el periodo de símbolo (T_s) tiende a ser más corto que el retardo (delay) del canal radio, lo cual se traduce en la llegada de símbolos retardados interfiriendo con otros símbolos en el receptor. En OFDM el flujo de datos en serie de alta velocidad se multiplexa en M flujos paralelos de menor tasa binaria, lo cual incrementa la duración de símbolo de cada canal por un factor aproximadamente M .

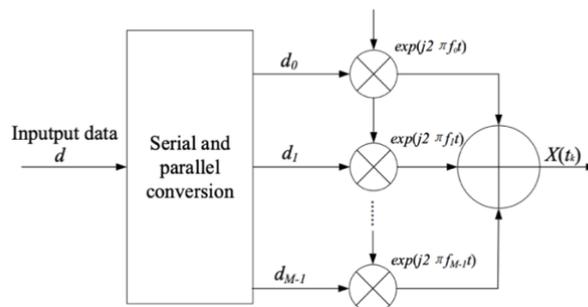


Figura 2.1. Conversión serie a paralelo en OFDM [16].

Esta operación tiene la ventaja de requerir un proceso de ecualización mucho menos complejo en el receptor, bajo la premisa de que la variación temporal de la respuesta al impulso del canal permanezca más o menos constante durante la transmisión de cada símbolo OFDM.

2.1.2. Transmisor y receptor LTE

El diagrama de bloques del transmisor y el receptor OFDM se puede apreciar en la siguiente figura:

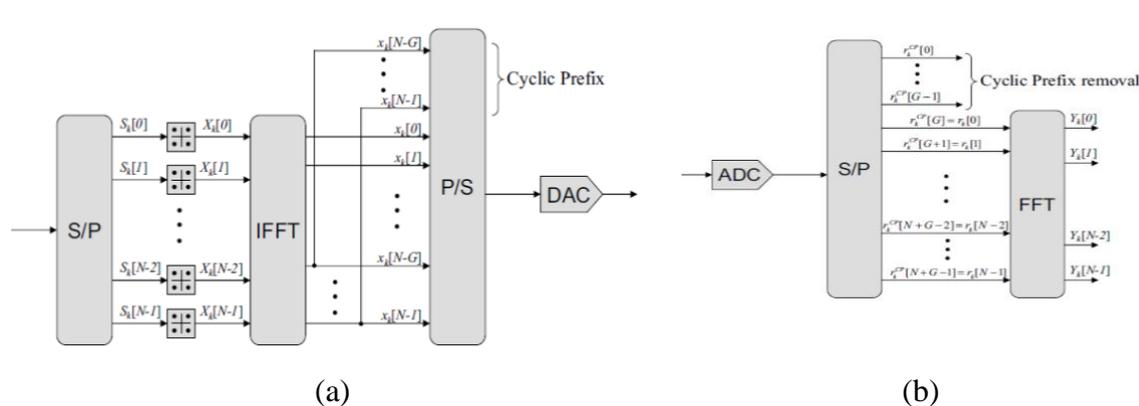


Figura 2.2. Diagramas de bloques en OFDM: (a) transmisor, (b) receptor [17].

La señal a transmitir se define en el dominio de la frecuencia, tras esto, un conversor serie a paralelo transforma los símbolos en serie en un bloque S_k de tamaño M donde el subíndice k representa el índice de los símbolos OFDM.

Los M datos paralelos son modulados de manera independiente (se podría utilizar modulaciones diferentes para cada uno, ya que el canal al ser selectivo en frecuencia sufre de diferentes atenuaciones, por lo que algunas subportadoras pueden permitirse utilizar constelaciones más compactas que otras) lo cual resulta en un vector complejo denominado X_k .



Al vector X_k se le realiza una Transformada de Fourier Discreta Inversa (IFFT) obteniendo un vector de tamaño N con valores complejos. Cabe destacar que en un sistema OFDM práctico el número de subportadoras procesadas es mayor que el número de subportadoras moduladas ($N \geq M$), substituyendo las subportadoras no moduladas con ceros.

La siguiente operación para la generación de la señal OFDM es la inclusión de un periodo de guarda al inicio de cada símbolo OFDM para reducir la ISI producida en la propagación multicamino. Para ello se emplea un prefijo cíclico (CP) como periodo de guarda, el cual no es más que las G últimas muestras del vector X_k , tal y como se puede apreciar entre los bloques IFFT y P/S de la Figura 2.2.a. Para evitar la ISI por completo la longitud del prefijo cíclico G debe ser más larga que la respuesta al impulso del canal radio, esto convierte la convolución lineal del canal (aperiódica) en una circular (periódica) lo que permite un procesado mediante una DFT.

La salida del bloque IFFT se demultiplexa en un flujo de datos serie para la transmisión. En el receptor se realizan las operaciones inversas para demodular la señal OFDM. Suponiendo una sincronización en tiempo y frecuencia en el receptor se remueven correctamente el número de muestras correspondientes al CP, de tal manera que únicamente un bloque de muestras libre de ISI entra al bloque FFT, si además el número de subportadoras N ha sido escogido para ser potencia de 2, es posible realizar una implementación muy eficiente de la FFT para transformar la señal de vuelta al dominio de la frecuencia e interpretar los símbolos recibidos. De los N flujos paralelos que salen de la FFT se seleccionan y se procesan los conjuntos modulados de M subportadoras.

Siendo $x(t)$ un símbolo de la señal transmitido en un instante de tiempo t , la señal recibida en un entorno multicamino está representada por:

$$r(t) = x(t) * h(t) + z(t) \quad (2.1)$$

Dónde $h(t)$ es la respuesta al impulso del canal en tiempo, $*$ representa la operación de convolución y $z(t)$ es el ruido. Suponiendo que $x(t)$ está acotada entre $-\frac{1}{2T_s}$ y $\frac{1}{2T_s}$ se puede muestrear a la frecuencia de muestreo F_s ($\frac{1}{T_s}$) satisfaciendo el criterio de Nyquist.

Como resultado de la propagación multicamino, muchas réplicas de las señales transmitidas llegan al receptor con diferentes retardos. Suponiendo que la respuesta al impulso del canal tiene una longitud menor o igual a G , el k símbolo OFDM recibido (incluyendo el CP) se puede expresar como:

$$R_x[m] = X_k[m] \cdot H[m] + Z_k[m] \quad (2.2)$$

Resumiendo, el CP en OFDM convierte una convolución lineal en una circular[18]. La convolución circular se transforma de manera muy eficiente mediante una FFT en una



multiplicación en el dominio de la frecuencia, por lo que una señal transmitida a través de un canal selectivo en frecuencia (multicamino) se convierte en una transmisión de N subcanales paralelos con atenuación plana en el dominio de la frecuencia. Como resultado la ecualización es mucho más simple en comparación con sistemas de una portadora (single-carrier) ya que consiste en una multiplicación compleja por cada subportadora.

2.1.3. Problemas en OFDM

2.1.3.1. Peak Average Power Ratio (PAPR)

Para un caso general, un transmisor OFDM puede interpretarse como una transformación lineal en el dominio de la frecuencia realizada sobre un bloque de símbolos complejos independientes y equidistribuidos modulados en QAM. Por el teorema del límite central, un símbolo OFDM en el dominio del tiempo puede aproximarse por una forma de onda Gaussiana.

Las variaciones en amplitud de la señal modulada en OFDM pueden ser muy altas y los amplificadores RF sólo pueden ser considerados lineales en un rango dinámico limitado, por tanto, la señal OFDM tiende a sufrir de distorsión no lineal lo que genera espúreos a diferentes frecuencias corrompiendo la señal.

El PAPR es una medida del rango dinámico en amplitud [19], para un símbolo OFDM está definida como el cuadrado de la amplitud pico entre la potencia media:

$$PAPR = \frac{\max_n\{|x[n]|^2\}}{E\{|x[n]|^2\}} \quad (2.3)$$

Existen varias técnicas para reducir el PAPR en una señal OFDM, estas técnicas pueden categorizarse según tres conceptos:

- Acotar y filtrar, la señal en tiempo se limita a cierto valor (saturación) y se filtran las componentes espectrales fuera del ancho de banda.
- Mapeo selectivo, se generan muchas señales diferentes representando el mismo símbolo OFDM mediante la multiplicación por diferentes vectores de fase.
- Técnicas de codificación, consiste en encontrar palabras código con el menor PAPR de un set de palabras código para mapear los datos de entrada.

Sin embargo, ninguna de estas técnicas se utiliza en LTE para el Downlink, delegando la generación de una señal OFDM adecuada a la estación base (eNB). En Uplink ni siquiera se emplea OFDM por lo que estas consideraciones tampoco se aplican.

2.1.3.2. Inter Carrier Interference (ICI)

La ortogonalidad en OFDM depende de la condición de que el transmisor y el receptor operan con la misma referencia frecuencial, si este no es el caso, se pierde la ortogonalidad



entre las subportadoras lo que supone la pérdida de información transmitida por dichas subportadoras, produciéndose un fenómeno denominado ICI [17] [20].

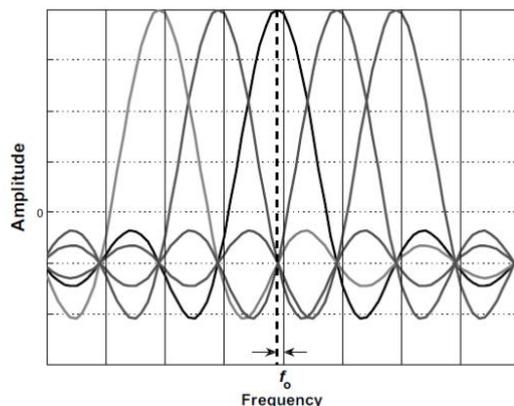


Figura 2.3. Pérdida de ortogonalidad entre subportadoras OFDM [17].

En el receptor, debido a la necesidad de utilizar componentes de bajo coste, se producen mayores derivas en el oscilador local en comparación con las producidas en el eNB, dichas derivas ocurren por parámetros como cambios en la tensión o la temperatura. La diferencia entre las frecuencias referencia está muy relacionada con el Carrier Frequency Offset (CFO). El ruido de fase en el equipo usuario (UE) receptor puede también provocar errores de frecuencia.

El CFO puede ser mucho más grande que la separación entre subportadoras y suele estar compuesto por una parte entera y una parte fraccionaria, por ello el error en frecuencia puede representarse como:

$$f_o = (\Gamma + \epsilon) \cdot \Delta f \quad (2.4)$$

Dónde Γ es un entero, $-0.5 < \epsilon < 0.5$ y Δf es la separación entre subportadoras.

Si $\Gamma \neq 0$ los datos modulados se encuentran en posiciones erróneas respecto al mapeo de las subportadoras realizado en el transmisor, lo que produce una tasa de error de bit (BER) de 0.5 si el offset de frecuencia no es compensado en el receptor, independientemente del valor de ϵ .

En el caso de $\Gamma = 0$ y $\epsilon \neq 0$ se pierde la ortogonalidad de las subportadoras, lo que se traduce en ICI que puede degradar la BER. Normalmente sólo errores de sincronización de poco porcentaje respecto al espacio entre subportadoras son tolerables en sistemas OFDM.

Incluso en el caso ideal dónde los osciladores locales están perfectamente alineados, la velocidad relativa entre transmisor y receptor genera también un error de frecuencia debido al efecto Doppler. En el caso de un canal con un único camino (single-path) la constante movilidad del UE en una dirección con respecto al ángulo de llegada de la señal resulta en un desplazamiento Doppler f_d , mientras que en un ambiente con dispersión esto se traduce en una difusión Doppler (spread) con densidad espectral de potencia $P(f)$.



La potencia de ICI puede calcularse por tanto como una función de la densidad espectral Doppler $P(f)$:

$$\int_{-f_{d_{max}}}^{f_{d_{max}}} P(f)(1 - \text{sinc}^2(T_s f)) d_f \quad (2.5)$$

Dónde $f_{d_{max}}$ es la máxima frecuencia Doppler y la potencia de la señal transmitida está normalizada. La ICI resultante del desajuste en f_o entre los osciladores en el transmisor y en el receptor puede modelarse como un desplazamiento Doppler en una propagación single-path:

$$P(f) = \delta(f - f_o) \quad (2.6)$$

Incluyendo la primera ecuación en la segunda, la potencia ICI en el caso de un CFO determinista está dada por:

$$P_{ICI,CFO} = 1 - \text{sinc}^2(f_o T_s) \quad (2.7)$$

Para el modelo clásico de Jakes (modelo para dispersiones tipo Rayleigh basado en un sumatorio de senoides) de dispersión Doppler, la primera ecuación puede escribirse como:

$$P_{ICI,Jakes} = 1 - 2 \int_0^1 (1 - f) J_0(2\pi f_{d_{max}} T_s f) d_f \quad (2.8)$$

Dónde J_0 es la función de Bessel con orden cero. Cuando no es posible estimar la forma del espectro Doppler se calcula un límite superior en la ICI aplicando la desigualdad de Cauchy-Schwartz:

$$P_{ICI} \leq \frac{\int_0^1 [1 - \text{sinc}^2(f_d T_s f)]^2 d_f}{\int_0^1 1 - \text{sinc}^2(f_d T_s f) d_f} \quad (2.9)$$

Este límite superior es sólo válido para el caso de dispersión frecuencial y no cubre el caso de un CFO determinista. Mediante las ecuaciones anteriores se obtiene finalmente la SIR en presencia de ICI:

$$SIR_{ICI} = \frac{1 - P_{ICI}}{P_{ICI}} \quad (2.10)$$

La sensibilidad del BER depende del orden de modulación. La modulación QPSK puede tolerar un $\epsilon_{m\acute{a}x}$ de 0.5, mientras que una 64-QAM requiere de un ϵ menor de 0.01.

2.1.3.3. Timing Offset



Para el caso de un canal sin memoria (sin dispersión en el retardo (delay spread)) OFDM es insensible a los errores de timing en la sincronización siempre que el desajuste sea menor que la duración del CP. Cualquier retardo en el timing de los símbolos (timing offset) sólo introduciría un desplazamiento en la fase constante de una subportadora a otra. La señal recibida en la subportadora m -ésima sería:

$$R_k[m] = X_k[m] \exp\left(j2\pi \frac{d_m}{N}\right) \quad (2.11)$$

Dónde d es el offset en la alineación de las muestras correspondiente a una duración igual a T_o .

Este desplazamiento en la fase puede ser recuperado en la operación de estimación del canal. En el caso general de un canal con delay spread para una longitud dada de CP, el timing offset máximo sin degradar la recepción OFDM está limitado por la longitud de la respuesta al impulso del canal, en el caso de superar este valor aparecen ISI e ICI.

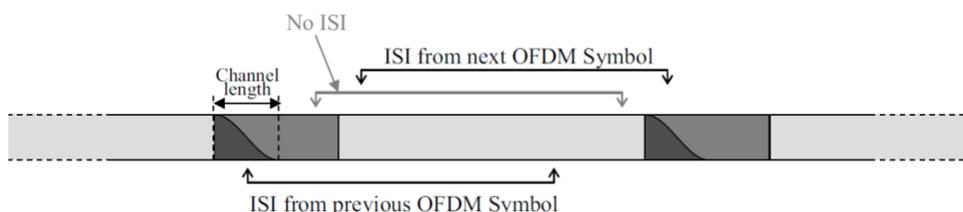


Figura 2.4. Sensibilidad OFDM frente a offsets en sincronización [17].

La adquisición inicial del timing en LTE se consigue mediante el proceso de búsqueda de celda y los procesos de sincronización. Para un tracking continuo del timing offset en la sincronización existen dos tipos de técnicas, unas basadas en la correlación de CPs y otras en señales de referencia (RSs), siendo posible la combinación de ambas.

2.2. OFDMA y SC-FDMA

2.2.1. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

OFDMA es una extensión de OFDM para la implementación de un sistema de comunicación multiusuario. En el apartado de OFDM se ha asumido que un único usuario recibía todas las subportadoras de datos en un instante dado, OFDMA distribuye las subportadoras a diferentes usuarios en el mismo instante temporal.

Para reducir el overhead que especifica qué subportadora pertenece a cada usuario, las subportadoras ubicadas de forma contigua suelen formar grupos, los grupos además suelen combinarse para formar canales físicos, los cuales están destinados a transmitir determinado tipo de datos.

Aunque en un principio para LTE, la técnica OFDMA se planteó exclusivamente como una FDMA dónde a cada usuario se le asigna un set de subcanales en frecuencia, actualmente permite combinarse con Time Division Multiple Access (TDMA), dónde los recursos de



información se definen como la información contenida en grupos de subportadoras durante un tiempo específico. En LTE esos recursos reciben el nombre de Resource Elements (REs).

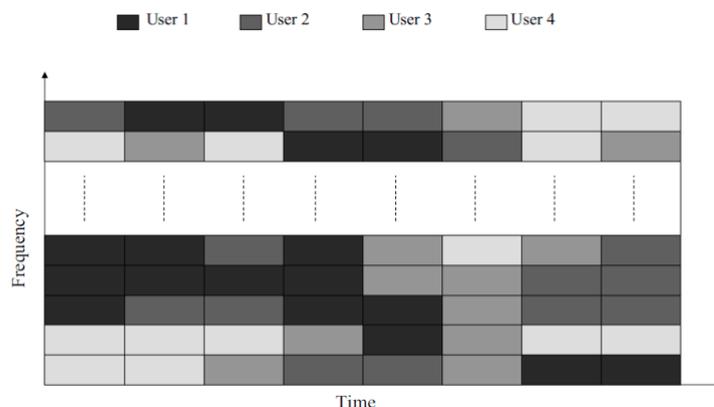


Figura 2.5. Ejemplo de ubicación de recursos en un sistema OFDMA/TDMA [15].

Cabe destacar que el número de subportadoras que se pueden asignar a un UE para transmisión están restringidas de tal manera que el tamaño de la DFT en LTE puede ser constituido por múltiplos de 2, 3 o 5. Esto permite implementaciones eficientes de FFT y de baja complejidad.

Ya se ha comentado que OFDM sufre de problemas con PAPR, los cuales no pueden ser resueltos en el UE debido a la necesidad de usar componentes de relativo bajo coste por el precio de los dispositivos móviles. Como solución, en Uplink se emplea una técnica de acceso al medio diferente, denominada Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).

2.2.2. Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

La idea en SC-FDMA [21] es que la señal modulada en una subportadora sea una combinación lineal de todos los datos transmitidos en ese mismo instante, es decir, en cada periodo de símbolo todas las subportadoras transmitidas en SC-FDMA llevan un componente de cada símbolo de datos modulados (no confundir símbolos OFDMA/SC-FDMA con símbolos de datos modulados en BPSK, QPSK...).

La siguiente figura muestra las diferencias entre OFDMA y SC-FDMA. Para una mejor representación gráfica de la diferencia en el PAPR se puede interpretar cada color con amplitudes diferentes.

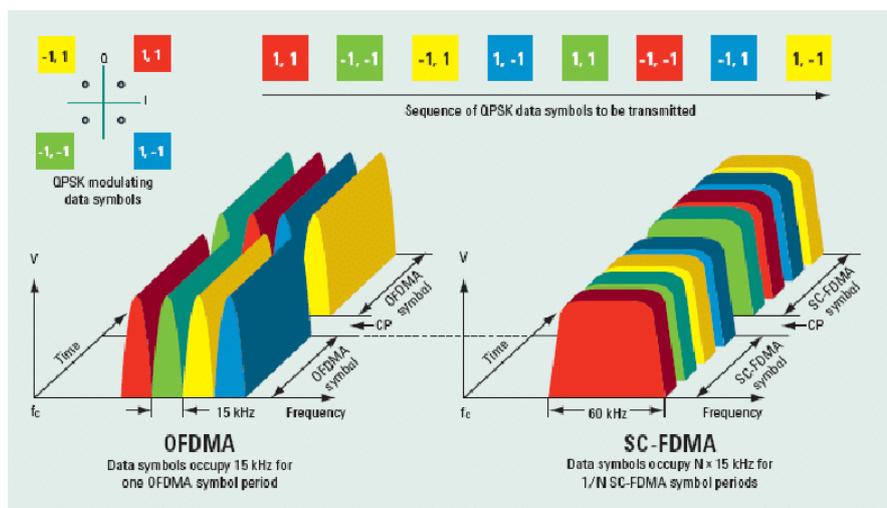


Figura 2.6. OFDMA vs SC-FDMA [22].

La señal SC-FDMA se puede generar tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

2.2.2.1. Generación en el dominio temporal

La generación de una señal SC-FDMA en el dominio del tiempo se representa en la figura 1.5. Puede entenderse como una transmisión single-carrier tradicional. Se mapea el flujo de datos de entrada en un flujo single-carrier de símbolos QPSK y QAM, los cuales están agrupados en bloques de longitud M.

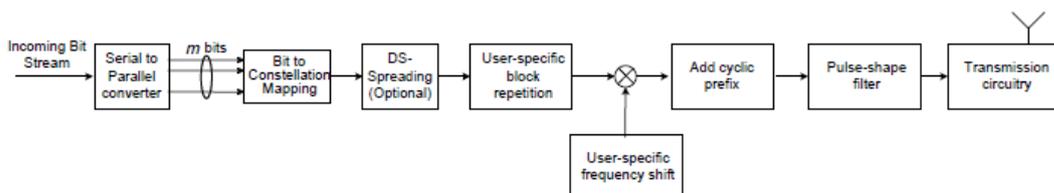


Figura 2.7. Generación en el dominio del tiempo de una señal SC-FDMA [17].

Esta agrupación en bloques puede verse repetida L veces junto con un desplazamiento en frecuencia específico para cada usuario, dónde cada transmisión de usuario puede colocarse en un slot del ancho de banda disponible. Tras esto, se inserta un CP, se realiza un filtrado y se transmite la señal.

La repetición de los bloques se traduce en un espectro de la señal cuyos valores sólo son distintos de cero para determinadas frecuencias de subportadora (en este ejemplo para cada subportadora L-ésima) tal y como muestra la siguiente figura.

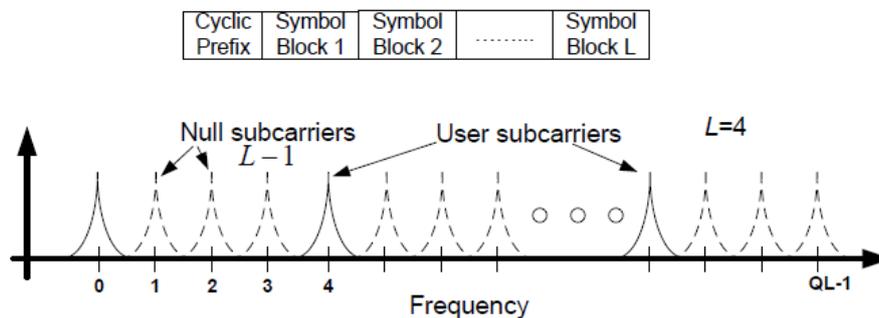


Figura 2.8. Transmisión distribuida mediante subportadoras con datos L-equiespaciadas [17].

Por lo tanto, el espectro de la señal transmitida en este caso es similar al que se obtendría si los símbolos fueran modulados cada subportadora L -ésima en una señal OFDM. Ya que cada señal únicamente ocupa una de cada L subportadoras, la transmisión se denomina “distribuida” y es una forma de proporcionar diversidad de ganancia en frecuencia.

Variando los parámetros M (la longitud del bloque) y L (número de repeticiones), bajo la condición de que el número total de subportadoras ocupadas en el ancho de banda ($M \times L$) es constante, se puede soportar un amplio abanico de tasas binarias.

Cuando no se realiza una repetición de los bloques ($L = 1$) la señal ocupa subportadoras consecutivas y la transmisión se denomina “localizada”. Las transmisiones localizadas son claves para soportar configuraciones selectivas en frecuencia, también proporcionan diversidad frecuencial si el set de subportadoras consecutivas tiene saltos en el dominio de la frecuencia, especialmente si el intervalo de tiempo entre saltos es más corto que la duración de un bloque de datos codificado.

Diferentes transmisiones de usuario con diferentes factores de repetición y/o anchos de banda permanecen ortogonales en el canal Uplink cuando se cumplen ciertas condiciones:

Los usuarios ocupan un set diferente de subportadoras, esto se suele conseguir mediante la introducción de variaciones en frecuencia específicas de usuario (se suele utilizar en el caso de transmisiones localizadas) o concretando para diferentes usuarios la ocupación de sets de subportadoras interpaginadas (Interleaved Frequency Division Multiple Access (IFDMA)).

Las señales recibidas se sincronizan correctamente en tiempo y frecuencia.

El CP es más largo que la suma del delay introducido por el canal y cualquier error de sincronización residual entre usuarios.

El nivel de PAPR en una SC-FDMA generada en el dominio del tiempo es similar al de una modulación single-carried de forma pulsada.



2.2.2.2. Generación en el dominio frecuencial

La generación de una señal SC-FDMA en el dominio de la frecuencia emplea una estructura denominada Discrete Fourier Transform-Spread OFDM (DFT-S-OFDM) ya que tal y como muestra la figura 2.7 el primer paso consiste en realizar una DFT de tamaño M para cada bloque de M símbolos QAM.

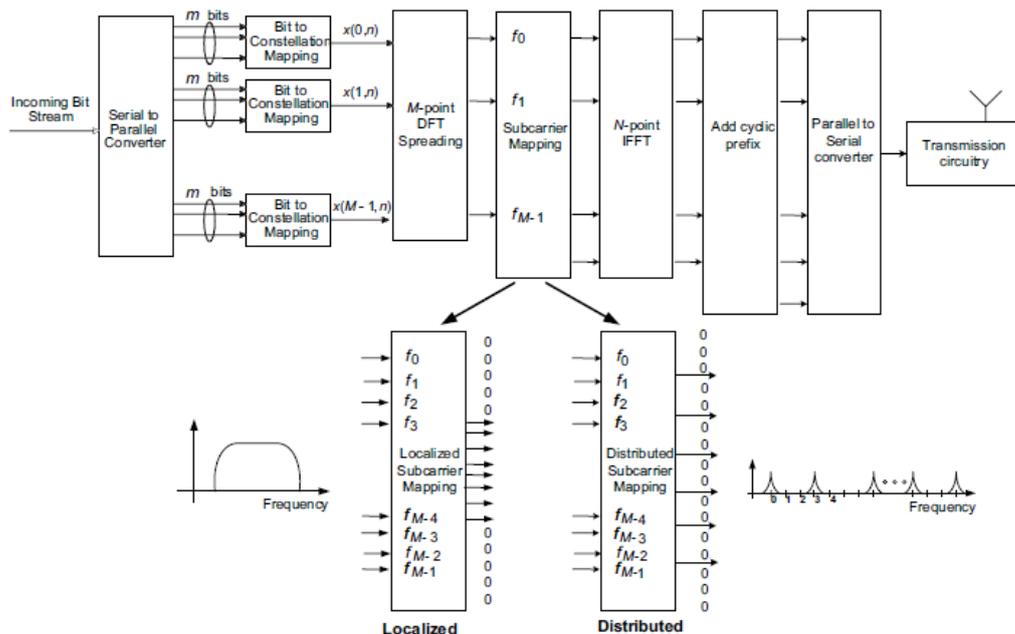


Figura 2.9. Diagrama de bloques para el procesamiento de una señal SC-FDMA generada en frecuencia [7].

Se insertan ceros entre los valores de salida de la DFT para igualar el tamaño de la DFT al de un modulador OFDM de N subportadoras (un IFFT). Tras esto, se mapea la salida de la DFT sobre las N subportadoras, dónde la posición de los ceros determina en qué subportadoras se mapearán los datos de salida de la DFT.

Normalmente N es mayor que el máximo número de subportadoras ocupadas (M), por lo que proporciona un sobremuestreo (oversampling) eficiente y una forma de pulsos tipo sinc.

La equivalencia entre una DFT-S-OFDM y una SC-FDMA generada en el dominio del tiempo se da en el caso $M = N$, dónde la operación del bloque DFT cancela la IFFT (no se añaden ceros) del modulador OFDM lo que resulta en una transmisión de los símbolos serie en el dominio del tiempo.

Al igual que en el caso de la generación en el dominio temporal, DFT-S-OFDM es capaz de generar transmisiones localizadas y distribuidas [23]:

Transmisión localizada: se asigna a un usuario un grupo de M subportadoras contiguas. Si $M < N$ los ceros añadidos a la salida del DFT provocan una versión sobremuestreada o interpolada de los símbolos QAM originales a la salida del IFFT del modulador OFDM. La señal transmitida es por tanto similar a una single-carrier de banda estrecha (narrowband)



con CP (equivalente a la generada en el dominio del tiempo con el caso de $L = 1$) y un filtrado con pulsos de forma tipo sinc (permite filtrado circular).

Transmisión distribuida: se asigna a un usuario M subportadoras equiespaciadas (cada subportadora L -ésima). Se insertan $(L - 1)$ ceros entre los valores de salida de la DFT tamaño M , esto resulta en una repetición de la forma de onda en el dominio del tiempo. Se añaden también ceros adicionales a cada lado de la salida de la DFT antes de la IFFT ($M \times L < N$). Todo esto genera una señal transmitida similar a la IFDMA en el dominio del tiempo con factor de repetición L y un filtro con forma de pulso tipo sinc.

Al igual que en SC-FDMA generada en el dominio del tiempo, la ortogonalidad entre diferentes usuarios con diferentes requisitos de tasas binarias puede ser alcanzada mediante la asignación de sets únicos de subportadoras a cada usuario, la estructura del CP es también similar.

2.2.2.3. Elección en LTE

Aunque DFT-S-OFDM y SC-FDMA generada en el dominio del tiempo son funcionalmente equivalentes, cada técnica requiere de unas operaciones diferentes de cara a generar la señal de forma eficiente. El filtro con forma de pulso empleado en la generación en el dominio del tiempo tiene un exceso de banda distinto de cero (colas de la sinc), lo que se traduce en una eficiencia en el ancho de banda menor a la que se obtiene mediante DFT-S-OFDM al emplear un filtro con forma de sinc (exceso de banda cero), el cual proviene de la inclusión de los ceros y la operación IFFT.

Simplificando, en SC-FDMA generada en el dominio del tiempo se implementa un filtro en el tiempo con forma de pulso lo que se traduce en el dominio espectral como una sinc, lo cual se traduce en colas fuera del ancho de banda de interés. En DFT-S-OFDM sin embargo se implementa un filtro de tipo pulso en el dominio frecuencial lo cual se traduce en una forma de onda tipo sinc en el dominio del tiempo.

El filtro con exceso de banda distinto de cero al generar SC-FDMA en el dominio del tiempo precisa además de tiempos de subida y bajada de 3 o 4 muestras de duración, aunque al no tener una pendiente de transición tan elevada permite reducir considerablemente el PAPR. Por lo que los diferentes métodos de generación de la señal SC-FDMA se traducen en un compromiso entre eficiencia en el ancho de banda y el PAPR.

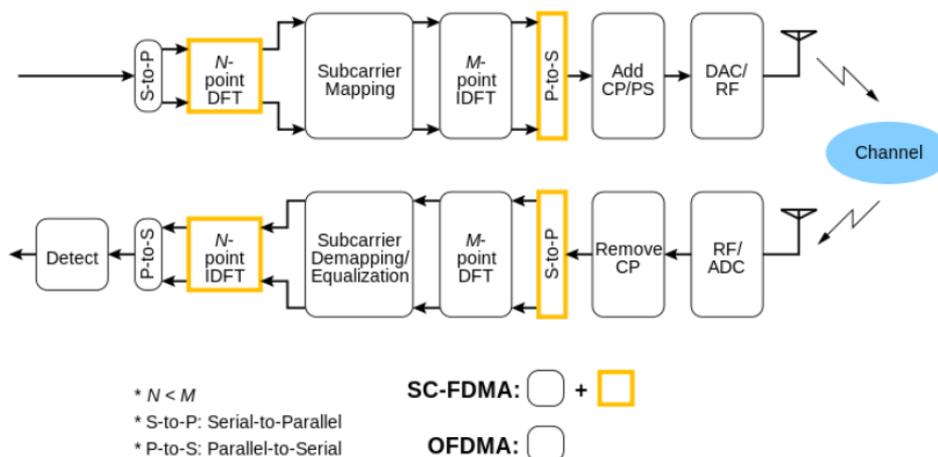


Figura 2.10. Diagrama de bloques para modular y demodular Downlink y Uplink en LTE [24].

La generación SC-FDMA en el dominio de la frecuencia para el canal Uplink tiene un beneficio extra ya que permite una configuración muy similar a la empleada en OFDM para el Downlink, incluyendo el mismo ancho de subportadora, el mismo número de subportadoras ocupadas para un ancho de banda dado y el mismo tamaño de CP. Esto proporciona una relación muy estrecha entre Downlink y Uplink incluyendo poder usar la misma frecuencia de reloj. Por estos motivos en LTE se emplea DFT-S-OFDM como método de generación de la señal Uplink.

3

Estructura temporal y frecuencial en LTE

3.1. Unidades de información

Los recursos tanto en transmisiones Downlink como Uplink poseen dimensiones de tiempo, frecuencia y espacio. La dimensión espacial está recogida en capas, y se accede a ella mediante el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción, lo que se conoce como una estructura Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO).

Las dimensiones en tiempo y frecuencia se definen en forma de una matriz o malla dónde el tiempo se representa en el eje de abscisas y la frecuencia en el eje de ordenadas. La descomposición de dicha matriz a nivel temporal se realiza mediante el uso de tramas, subtramas, slots y tiempos de símbolo OFDM, mientras que la descomposición a nivel frecuencial se realiza mediante subportadoras OFDM.

En LTE, una trama tiene una duración temporal de 10 ms, dicha trama se descompone a su vez en 10 subtramas de 1 ms, las cuales contienen 2 slots de 0.5 ms de duración.

Cada slot está compuesto por 6 o 7 símbolos OFDM con un CP al inicio de cada uno. Puede utilizarse un CP de duración normal (permite 7 símbolos OFDM por slot) o extendido (limita a 6 símbolos OFDM por slot). En las figuras y ejemplos se tiende a emplear prefijos cíclicos de duración normal, es decir, 7 símbolos OFDM por slot.

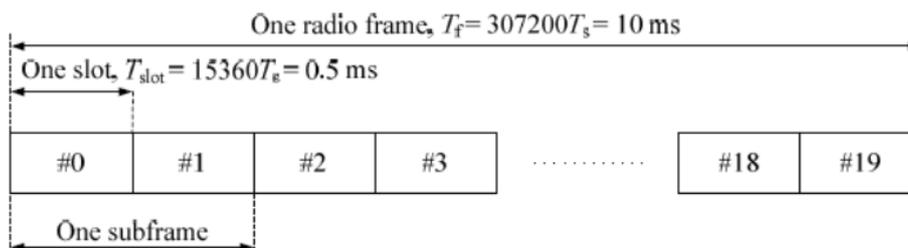


Figura 3.1. Estructura temporal a nivel de trama en LTE [25].

En frecuencia, cada símbolo OFDM está compuesto por 12 subportadoras, las cuales están separadas entre sí 15 KHz, este valor está estipulado por 3GPP al proporcionar un buen compromiso entre la Interferencia entre Símbolos y el efecto Doppler.

El mínimo recurso de información en LTE recibe el nombre de Resource Element (RE) y se define como una subportadora OFDM durante un tiempo de símbolo de 66.7 microsegundos.



Un conjunto de 72 REs con un CP extendido (12 x 6) o de 84 REs con un CP normal (12 x 7) constituyen un Resource Block (RB).

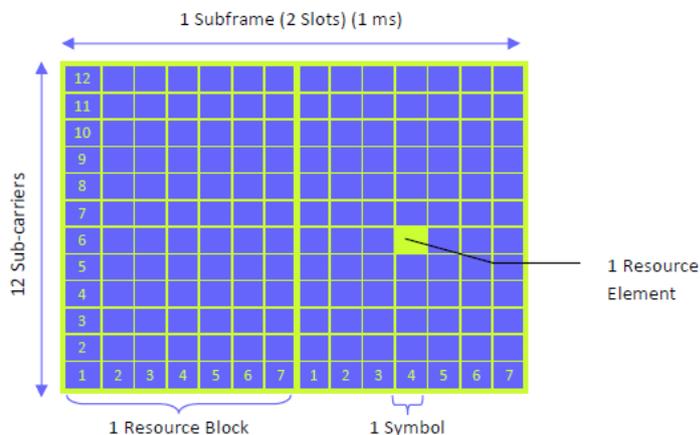


Figura 3.2 Matriz de dos RBs contiguos en el tiempo [26].

LTE permite determinados anchos de banda de sistema, que junto con el resto de valores anteriormente comentados constituye la siguiente tabla 3.1:

Tabla 3.1. Parámetros que constituyen la estructura de una trama en LTE.

Ancho de banda del canal (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Duración de la trama (ms)	10					
Duración de la subtrama (ms)	1					
Espacio entre subportadoras (KHz)	15					
Frecuencia de muestreo (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Tamaño de la FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Subportadoras con datos	76	151	301	601	901	1201
Subportadoras de guarda	52	105	211	423	635	847
Número de Resource Blocks	6	12	25	50	75	100
Símbolos OFDM por subtrama	7 (CP corto) / 6 (CP largo)					
Longitud de prefijo cíclico corto (µs)	5.2 (primer símbolo OFDM) / 4.69 (resto)					
Longitud de prefijo cíclico largo (µs)	16.67					



Cabe destacar que la frecuencia de muestreo ($F_s = \frac{1}{T_s}$) es siempre múltiplo de **3.84 MHz**, esto es debido a que el chip de UMTS funciona precisamente a esa frecuencia y de esta forma se permite una compatibilidad con el estándar anterior.

El tiempo de información útil (sin el CP) de cada símbolo OFDM es de 66.7 microsegundos (1/15KHz), sin embargo, al no ser 0.5 ms (duración temporal del slot) divisible entre este valor se introduce un CP de mayor duración al inicio del primer símbolo OFDM, lo cual se traduce en que el primer símbolo OFDM en un slot tiene mayor duración que el resto de símbolos OFDM de ese mismo slot.

Con estos datos es posible calcular la tasa binaria de la comunicación con la siguiente fórmula:

$$R \left(\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right) = \frac{RBs * 12 * OFDMs * Bits * MIMO}{5^{-4}} * CC \quad (3.1)$$

Dónde cada elemento de la fórmula es:

- **RBs**, es el número de Resource blocks.
- **12**, debido a el número de subportadoras en un RB.
- **OFDMs**, es el número de símbolos en un slot, pudiendo tomar el valor 6 o 7.
- **Bits**, es el número de bits en la modulación empleada (2 para QPSK, 4 para 16QAM etc.).
- **MIMO**, es el número de antenas empleadas.
- 5^{-4} , de la duración de un slot, 0.5 ms.
- **CC**, es el código de control de errores empleado.

Por ejemplo, si se utiliza una comunicación LTE con ancho de banda de sistema de 20 MHz, una modulación 64QAM para las subportadoras, utilizando un prefijo cíclico normal, con una MIMO 4x4 y un CC de 3/4:

$$R \left(\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right) = \frac{100 * 12 * 7 * 6 * 4}{5^{-4}} * \frac{3}{4} \approx 300 \text{ Mbps}$$

3.2. Configuración Downlink/Uplink

Existen dos tipos de configuraciones para la transmisión Downlink y Uplink, el tipo 1 para una multiplexación TDD (Time Domain Duplexing), el tipo 2 para una multiplexación FDD (Frequency Domain Duplexing).

El tipo 2 es el más sencillo de entender conceptualmente puesto que la estructura de tramas en LTE previamente descrita es de carácter temporal, por tanto, esta distribución simplemente utiliza distintos canales en frecuencia para Uplink y Downlink.

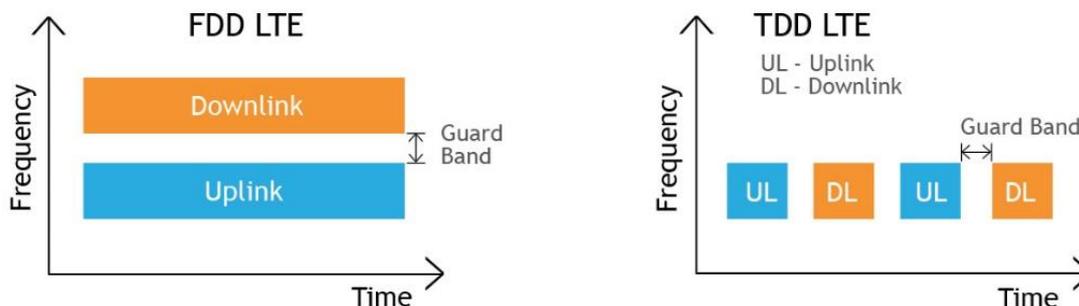


Figura 3.3 Esquema de FDD frente TDD en LTE [27].

El tipo 1, al distribuir los canales de Downlink y Uplink en el dominio temporal mediante la misma estructura de tramas, tiene una configuración más compleja, tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla 3.2.

Tabla 3.2. Configuración Downlink/Uplink para cada subtrama.

Configuración Downlink/Uplink	Número de subtrama									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

LTE recoge 7 tipos de configuraciones para LTE TDD, donde se estipula que subtrama llevará la información Uplink y Downlink, cabe destacar que las tres primeras subtramas no varían entre configuraciones.

Se incluye un tipo de subtrama denominada Switch (o de intercambio), la cual está compuesta de 3 partes: el Downlink Pilot Time Slot (DwPTS), el Guard Period (GP) y el Uplink Pilot Time Slot (UpPTS). La duración de cada uno viene definida por un número de formato, existiendo 10 formatos distintos posibles (Tabla 3.3):

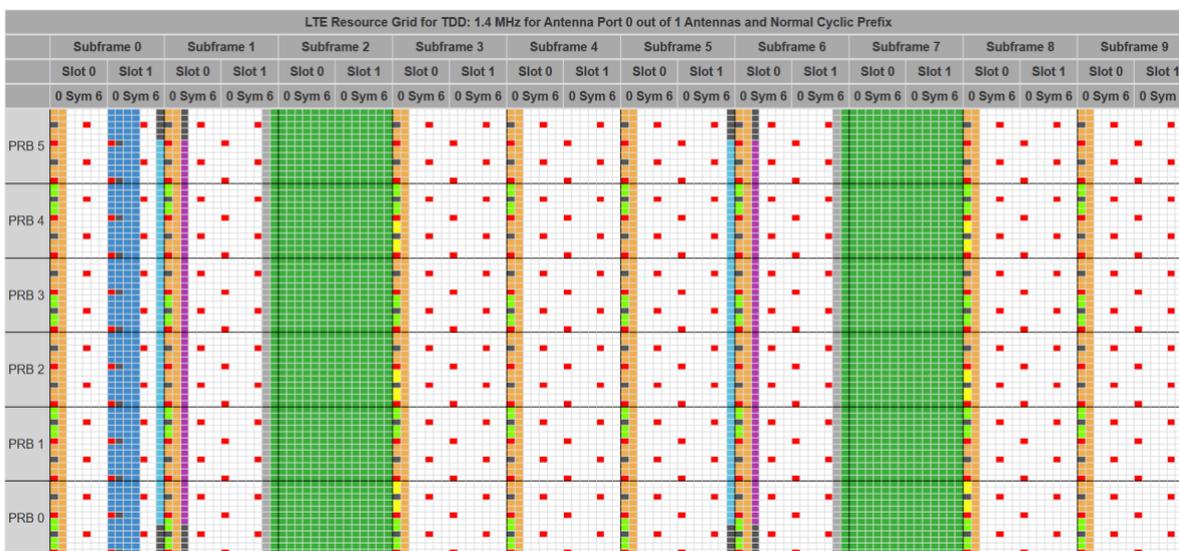


Tabla 3.3. Estructura temporal de una subtrama tipo Switch.

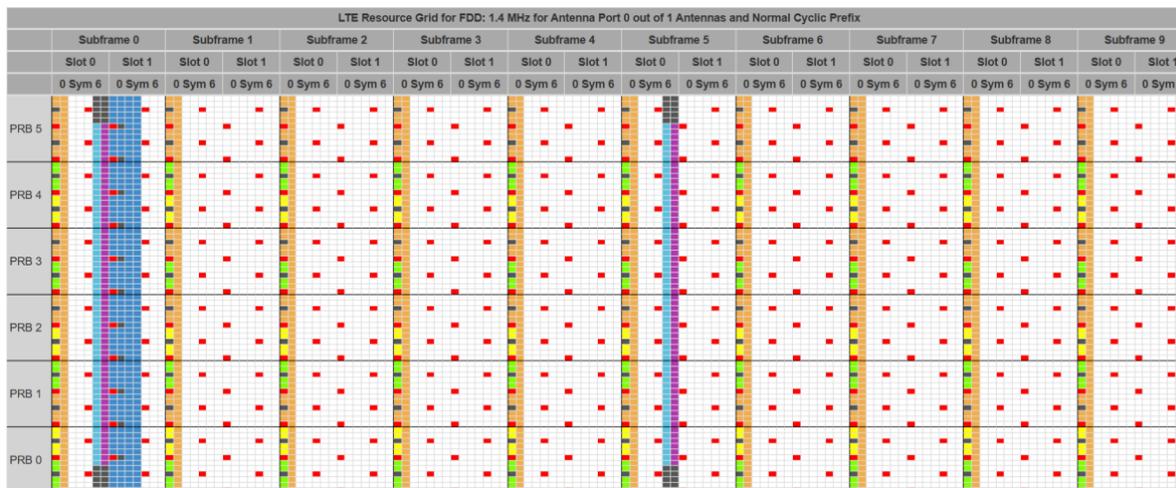
Formato para subtrama Switch	CP corto en Downlink			CP largo en Downlink		
	DwPTS	UpPTS		DwPTS	UpPTS	
		CP corto en Uplink	CP largo en Uplink		CP corto en Uplink	CP largo en Uplink
0	$6592 \cdot T_s$	$2192 \cdot T_s$	$2560 \cdot T_s$	$7680 \cdot T_s$	$2192 \cdot T_s$	$2560 \cdot T_s$
1	$19760 \cdot T_s$			$20480 \cdot T_s$		
2	$21952 \cdot T_s$			$23040 \cdot T_s$		
3	$24144 \cdot T_s$			$25600 \cdot T_s$		
4	$26336 \cdot T_s$			$7680 \cdot T_s$		
5	$6592 \cdot T_s$	$4384 \cdot T_s$	$5120 \cdot T_s$	$20480 \cdot T_s$	$4384 \cdot T_s$	$5120 \cdot T_s$
6	$19760 \cdot T_s$			$23040 \cdot T_s$		
7	$21952 \cdot T_s$			$12800 \cdot T_s$		
8	$24144 \cdot T_s$			-		
9	$13168 \cdot T_s$			-		

El GP se calcula substrayendo del tiempo de la subtrama (1 ms) los valores de DwPTS y UpPTS.

La figura 2.1.4 muestra un ejemplo de un Resource Grid (RG), definido como el conjunto de X RBs en una trama, siendo X el ancho de banda del sistema entre 180 KHz (12 subportadoras x 15 KHz), en el RG se distribuyen todas las señales y canales físicos. Al contemplarse como mínimo ancho de banda de sistema 1.4 MHz (6 RBs) ninguna señal o canal físico puede tener una restricción mínima de ocupar más de 72 portadoras.



(a)



(b)

Figura 3.4 RG Downlink de ejemplo, (a) TDD (b) FDD [28].

Tabla 3.4. Canales físicos del RG ejemplo por colores.

Color	Canal físico
Black	Reservados
Red	Pilotos de referencia
Green	PCFICH
Yellow	PHICH
Orange	PDCCH
White	PDSCH
Purple	PSS
Light Blue	SSS
Dark Blue	PBCH

3.3. Introducción a señales y canales físicos

Aunque algunos están íntimamente relacionados con capas superiores a la física en LTE se definen 5 canales físicos para Downlink, 3 canales físicos para Uplink, 3 señales de



referencia/sincronización para Downlink y 2 señales de referencia/sincronización para Uplink [29].

- Downlink:
 - **PDSCH** (Physical Downlink Shared Channel) lleva los datos de usuario y los System Information Blocks (SIBs).
 - **PBCH** (Physical Broadcast Channel) lleva exclusivamente el Master Information Block (MIB) que aporta información de la comunicación esencial para el UE como el ancho de banda del sistema.
 - **PCFICH** (Physical Control Format Indicator Channel) lleva exclusivamente el CFI, el cual contiene información acerca del resto de canales de control.
 - **PDCCH** (Physical Downlink Control Channel) lleva el Downlink Control Indicator (DCI) con información esencial para la decodificación de las tramas en el UE, así como la modulación de cada canal.
 - **PHICH** (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) lleva la confirmación (ACK) al UE de la información recibida en el Uplink.
 - **P-SS** (Primary Synchronization Signal) está conformada por una secuencia de 62 valores Zadoff Chu, es lo primero que captura el UE, además de sincronización, especifica un valor denominado número de celda, el cual se utiliza para obtener el Physical Cell ID.
 - **S-SS** (Secundary Synchronization Signal) está conformada por secuencias de longitud máximas (m-sequences), indica en que subtrama se encuentra la P-SS recibida y proporciona un valor denominado grupo de celda, también necesario para obtener el Physical Cell ID.
 - **RS** (Reference Signal) son pilotos de referencia distribuidos por todo el RG y sirven para hacer una estimación del canal en el UE.

- Uplink:
 - **PUCCH** (Physical Uplink Control Channel) lleva toda la información de control del Uplink recogida en varios parámetros.
 - **PUSCH** (Physical Uplink Shared Channel) lleva los datos que el UE quiere transmitir en la red.
 - **PRACH** (Physical Random Access Channel) se utiliza para la primera conexión del UE con la red, proceso de establecer la conexión.
 - **DM-RS** (Demodulation Reference Signals) permiten estimación del canal y demodulación coherente.
 - **SRS** (Sounding Reference Signals) permiten al eNB realizar un “sounding” del canal, facilitan características importantes de LTE como la organización selectiva en frecuencia del Uplink, el control de potencia, la estimación del timing, la selección de la antena etc.

Cada canal y señal se distribuye de forma diferente en el GRID además de llevar la información mediante diferentes modulaciones y emplear diferentes codificaciones. A



continuación, se describen todos estos elementos de la capa física, empezando por su funcionalidad, seguido de su generación para después finalizar con su ubicación en el GRID.



4

Técnicas de codificación

4.1. Cyclic Redundancy Check

Los Cyclic Redundancy Check (CRC) son códigos detectores de errores que permiten al receptor asegurarse de que la información recibida no se encuentra alterada (hasta cierto límite), más concretamente son cadenas binarias de longitud fija que se añaden al final del mensaje [30]. El ejemplo más sencillo es el CRC con longitud 1, denominado bit de paridad donde se añade un 1 o un 0 al final de los datos de tal forma que el número total de unos sea par.

En la operación CRC se tienen dos partes, el mensaje que se desea codificar y un polinomio de grado n que genera el CRC de tamaño $n-1$ que se añade al final del mensaje. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se añaden $n-1$ ceros a la derecha del mensaje.
- Se escribe el polinomio generador en forma binaria.
- Se realiza una división modulo 2 siendo:
 - Dividendo: mensaje + $n-1$ ceros.
 - Divisor: polinomio generador en binario.
 - Resto: CRC resultante.

En LTE se utilizan distintos CRC de varias longitudes dependiendo del mensaje en el que se incluyen, a continuación se muestra un ejemplo con un polinomio generador de grado 4 y un mensaje relativamente corto para exponer de forma gráfica el procedimiento.

Polinomio Generador: $X^4 + X^2 + X + 1 \rightarrow 10111$

Mensaje: 10110111

101101110000	<u>10111</u>
<u>00000</u>	00111001
001101	
<u>000000</u>	
0011011	
<u>0010111</u>	
00011001	
<u>00010111</u>	
000011100	



```
000010111
-----
0000010110
0000000000
-----
00000001100
0000000000
-----
000000011000
000000010111
-----
000000001111
```

Los polinomios generadores varían en función del canal y el mensaje, en LTE se utilizan 4 polinomios diferentes:

- $g_{CRC24A} = X^{24} + X^{23} + X^{18} + X^{17} + X^{14} + X^{11} + X^{10} + X^7 + X^6 + X^5 + X^4 + X^3 + X + 1$
- $g_{CRC24B} = X^{24} + X^{23} + X^6 + X^5 + X + 1$
- $g_{CRC16} = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$
- $g_{CRC8} = X^8 + X^7 + X^4 + X^3 + X + 1$

4.2. Código Convolutivo

Tras añadir el CRC, se introduce la secuencia en un codificador convolutivo que generará un código convolutivo o turbo código. Un código convolutivo es un código corrector de errores o FEC (Forward Correction Code) generado mediante un codificador convolutivo [31].

Un codificador convolutivo es una estructura que realiza una convolución de la secuencia de entrada con la respuesta al impulso del codificador, para ello consta de m etapas o registros en los que se latchea la secuencia de entrada durante un ciclo de reloj, las n secuencias de salida son sumas binarias de los bits ubicados en dichos registros.

Como nomenclatura para indicar las combinaciones de sumas que generan la secuencia de salida se utilizan polinomios generadores, su expresión puede ser polinómica o directamente binaria.

Los turbocódigos son un tipo de código convolutivo cuya eficiencia energética está muy cerca del límite teórico enunciado por Shannon por lo que se utilizan en aplicaciones de baja potencia y muy especialmente en comunicaciones inalámbricas.

En LTE se utiliza un codificador de 6 registros y 3 salidas, cuyos polinomios generadores son:

- $g_0 = 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1$



- $g_1 = 1111001$
- $g_2 = 1110101$

Lo que se traduce en la siguiente estructura:

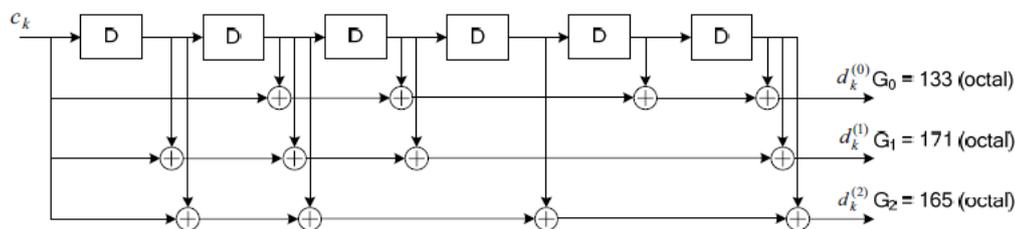


Figura 4.1 Turbocódigo en LTE con $m=6$, $n=3$ y $k=1$ [31].

Siendo d_k las tres salidas del codificador convolucional, lo que triplica la carga binaria del mensaje codificado. A continuación, se muestra el código programado en Matlab para el codificador convolucional:

```
function [out] = convolucional_lte(in)
buffer = in(end-5:end);
out1 = zeros(1,length(in));
out2 = zeros(1,length(in));
out3 = zeros(1,length(in));
for k=1:length(in)
    out1(k) = mod(in(k) + buffer(2) + buffer(3) + buffer(5) + buffer(6),2);
    out2(k) = mod(in(k) + buffer(1) + buffer(2) + buffer(3) + buffer(6),2);
    out3(k) = mod(in(k) + buffer(1) + buffer(2) + buffer(4) + buffer(6),2);
    buffer = circshift(buffer,1);
    buffer(1) = in(k);
end
out = [out1 out2 out3];
end
```

4.3. Interleaving y Rate Matching

Las tres cadenas que genera el codificador convolucional no se unen de manera directa para generar una secuencia final si no que a cada una de ellas se le aplica un Interleaving, esto quiere decir que los bits se alteran de posición. El Rate Matching es un mecanismo mediante el cual se alarga una secuencia la longitud deseada proporcionando redundancia, y por tanto, protección frente a errores en la comunicación. En LTE el proceso de Interleaving para cada secuencia d_k y su posterior Rate Matching [32] se representa en la figura 4.2 :

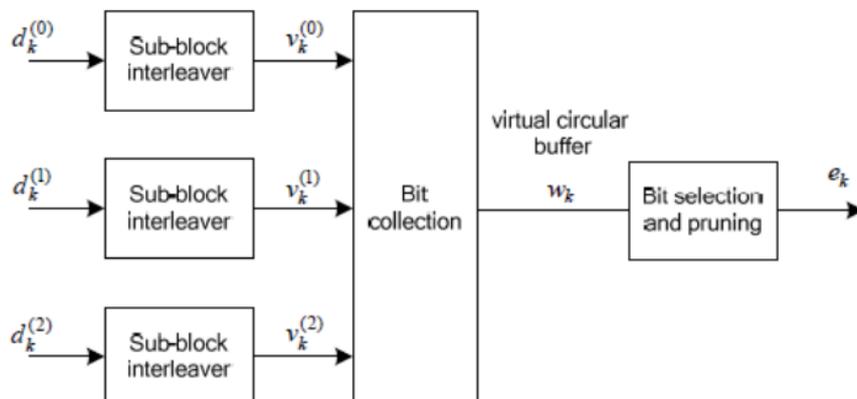


Figura 4.2 Interleaving y Rate Matching en LTE [32].

El algoritmo de cada sub-bloque interleaver descrito en el estándar simplificado es el siguiente:

1. Siendo D la longitud de la secuencia d_k de entrada, determina el mínimo número entero X que cumpla:

$$D \leq 32 * X$$

2. Inicializa una matriz de 32 columnas y X filas.
3. Rellena la matriz con los bits de la secuencia d_k empezando por la primera fila de izquierda a derecha, cuando se complete una fila se pasa a la inmediatamente inferior rellenándola también de izquierda a derecha. En el caso de que en la última fila X queden posiciones vacías debido a que $D < 32 * X$ dichas posiciones vacías se rellenan con <NULL> (en el ejemplo de Matlab en lugar de <NULL> es el número 3).
4. Las columnas se numeran de izquierda a derecha siendo la primera el 0 y la última 31. Se permutan hasta obtener en cada fila:

[0, 16, 8, 24, 4, 20, 12, 28, 2, 18, 10, 26, 6, 22, 14, 30, 1, 17, 9, 25, 5, 21, 13, 29, 3, 19, 11, 27, 7, 23, 15, 31]

5. La secuencia v_k a la salida del sub-bloque interleaver serán los bits de la matriz permutada columna a columna, empezando por la columna de la izquierda y extrayendo los bits de arriba a abajo.

La secuencia w_k es la unión de las tres secuencias v_k a la salida de cada sub-bloque interleaver por orden de índice.

$$w_k = [v_k^0 \ v_k^1 \ v_k^2]$$

Tras haber obtenido la secuencia w_k se realiza un rate matching para alcanzar la longitud final de secuencia deseada, esta longitud varía en función del mensaje a codificar por lo que



el Rate Matching a implementar debe ser de tipo genérico. El algoritmo descrito en el estándar es el siguiente:

```
Set k = 0 and j = 0
while { k < E }
if  $w_{(j \bmod k_w)} \neq \langle NULL \rangle$ 
 $e_k = w_{(j \bmod k_w)}$ 
k = k + 1
end if
j = j + 1
end while
```

A continuación, se muestra el código programado en Matlab para Interleaving y Rate Matching.

```
function [out] = interleaving_ratematching(d0,d1,d2,longitud)

Ctcsubblock0 = 32;
Ctcsubblock1 = 32;
Ctcsubblock2 = 32;

D0 = length(d0);
D1 = length(d1);
D2 = length(d2);
Rtcsubblock0 = 0;
Rtcsubblock1 = 0;
Rtcsubblock2 = 0;

condicion0 = 0;
condicion1 = 0;
condicion2 = 0;

while D0 >= condicion0
    Rtcsubblock0 = Rtcsubblock0 + 1;
    condicion0 = 32*Rtcsubblock0;
end

while D1 >= condicion1
    Rtcsubblock1 = Rtcsubblock1 + 1;
    condicion1 = 32*Rtcsubblock1;
end

while D2 >= condicion2
    Rtcsubblock2 = Rtcsubblock2 + 1;
    condicion2 = 32*Rtcsubblock2;
end
```



```

matriz0 = zeros(Rtcsubblock0,Ctcsubblock0);
matriz1 = zeros(Rtcsubblock1,Ctcsubblock1);
matriz2 = zeros(Rtcsubblock2,Ctcsubblock2);

Nd0 = 0;
Nd1 = 0;
Nd2 = 0;

if Rtcsubblock0*Ctcsubblock0 > D0
    Nd0 = Rtcsubblock0*Ctcsubblock0 - D0;
end

if Rtcsubblock1*Ctcsubblock1 > D1
    Nd1 = Rtcsubblock1*Ctcsubblock1 - D1;
end

if Rtcsubblock2*Ctcsubblock2 > D2
    Nd2 = Rtcsubblock2*Ctcsubblock2 - D2;
end

padbits0 = ones(1,Nd0)*3;
padbits1 = ones(1,Nd1)*3;
padbits2 = ones(1,Nd2)*3;

padbits0 = [padbits0 d0(1:D0)];
padbits1 = [padbits1 d1(1:D1)];
padbits2 = [padbits2 d2(1:D2)];

dim0 = size(matriz0);
dim1 = size(matriz1);
dim2 = size(matriz2);

for p0=1:dim0(1)
    matriz0(p0,:) = padbits0((p0-1)*32+1:p0*32);
end

for p1=1:dim1(1)
    matriz1(p1,:) = padbits1((p1-1)*32+1:p1*32);
end

for p2=1:dim2(1)
    matriz2(p2,:) = padbits2((p2-1)*32+1:p2*32);
end

matriz01 = zeros(Rtcsubblock0,Ctcsubblock0);
matriz11 = zeros(Rtcsubblock1,Ctcsubblock1);
matriz21 = zeros(Rtcsubblock2,Ctcsubblock2);

matriz01(:,17) = matriz0(:,1);
matriz01(:,18) = matriz0(:,17);
matriz01(:,19) = matriz0(:,9);
matriz01(:,20) = matriz0(:,25);
matriz01(:,21) = matriz0(:,5);
matriz01(:,22) = matriz0(:,21);
matriz01(:,23) = matriz0(:,13);
matriz01(:,24) = matriz0(:,29);
matriz01(:,25) = matriz0(:,3);
matriz01(:,26) = matriz0(:,19);
matriz01(:,27) = matriz0(:,11);
matriz01(:,28) = matriz0(:,27);
matriz01(:,29) = matriz0(:,7);

```



```
matriz01(:,30) = matriz0(:,23);
matriz01(:,31) = matriz0(:,15);
matriz01(:,32) = matriz0(:,31);
matriz01(:,1) = matriz0(:,2);
matriz01(:,2) = matriz0(:,18);
matriz01(:,3) = matriz0(:,10);
matriz01(:,4) = matriz0(:,26);
matriz01(:,5) = matriz0(:,6);
matriz01(:,6) = matriz0(:,22);
matriz01(:,7) = matriz0(:,14);
matriz01(:,8) = matriz0(:,30);
matriz01(:,9) = matriz0(:,4);
matriz01(:,10) = matriz0(:,20);
matriz01(:,11) = matriz0(:,12);
matriz01(:,12) = matriz0(:,28);
matriz01(:,13) = matriz0(:,8);
matriz01(:,14) = matriz0(:,24);
matriz01(:,15) = matriz0(:,16);
matriz01(:,16) = matriz0(:,32);

matriz11(:,17) = matriz1(:,1);
matriz11(:,18) = matriz1(:,17);
matriz11(:,19) = matriz1(:,9);
matriz11(:,20) = matriz1(:,25);
matriz11(:,21) = matriz1(:,5);
matriz11(:,22) = matriz1(:,21);
matriz11(:,23) = matriz1(:,13);
matriz11(:,24) = matriz1(:,29);
matriz11(:,25) = matriz1(:,3);
matriz11(:,26) = matriz1(:,19);
matriz11(:,27) = matriz1(:,11);
matriz11(:,28) = matriz1(:,27);
matriz11(:,29) = matriz1(:,7);
matriz11(:,30) = matriz1(:,23);
matriz11(:,31) = matriz1(:,15);
matriz11(:,32) = matriz1(:,31);
matriz11(:,1) = matriz1(:,2);
matriz11(:,2) = matriz1(:,18);
matriz11(:,3) = matriz1(:,10);
matriz11(:,4) = matriz1(:,26);
matriz11(:,5) = matriz1(:,6);
matriz11(:,6) = matriz1(:,22);
matriz11(:,7) = matriz1(:,14);
matriz11(:,8) = matriz1(:,30);
matriz11(:,9) = matriz1(:,4);
matriz11(:,10) = matriz1(:,20);
matriz11(:,11) = matriz1(:,12);
matriz11(:,12) = matriz1(:,28);
matriz11(:,13) = matriz1(:,8);
matriz11(:,14) = matriz1(:,24);
matriz11(:,15) = matriz1(:,16);
matriz11(:,16) = matriz1(:,32);

matriz21(:,17) = matriz2(:,1);
matriz21(:,18) = matriz2(:,17);
matriz21(:,19) = matriz2(:,9);
matriz21(:,20) = matriz2(:,25);
matriz21(:,21) = matriz2(:,5);
matriz21(:,22) = matriz2(:,21);
matriz21(:,23) = matriz2(:,13);
matriz21(:,24) = matriz2(:,29);
```



```

matriz21(:,25) = matriz2(:,3);
matriz21(:,26) = matriz2(:,19);
matriz21(:,27) = matriz2(:,11);
matriz21(:,28) = matriz2(:,27);
matriz21(:,29) = matriz2(:,7);
matriz21(:,30) = matriz2(:,23);
matriz21(:,31) = matriz2(:,15);
matriz21(:,32) = matriz2(:,31);
matriz21(:,1) = matriz2(:,2);
matriz21(:,2) = matriz2(:,18);
matriz21(:,3) = matriz2(:,10);
matriz21(:,4) = matriz2(:,26);
matriz21(:,5) = matriz2(:,6);
matriz21(:,6) = matriz2(:,22);
matriz21(:,7) = matriz2(:,14);
matriz21(:,8) = matriz2(:,30);
matriz21(:,9) = matriz2(:,4);
matriz21(:,10) = matriz2(:,20);
matriz21(:,11) = matriz2(:,12);
matriz21(:,12) = matriz2(:,28);
matriz21(:,13) = matriz2(:,8);
matriz21(:,14) = matriz2(:,24);
matriz21(:,15) = matriz2(:,16);
matriz21(:,16) = matriz2(:,32);

out0 = zeros(1,dim0(1)*dim0(2));
out1 = zeros(1,dim1(1)*dim1(2));
out2 = zeros(1,dim2(1)*dim2(2));

for u=1:dim0(2)
    out0((u-1)*2+1:u*2) = matriz01(:,u);
end

for u=1:dim1(2)
    out1((u-1)*2+1:u*2) = matriz11(:,u);
end

for u=1:dim2(2)
    out2((u-1)*2+1:u*2) = matriz21(:,u);
end

buffer = [out0 out1 out2];

k = 0;
j = 0;

out = zeros(1,longitud);
kw = length(buffer);

while (k<longitud)
operacion = buffer((mod(j,kw))+1);
    if operacion ~= 3
        out(k+1) = operacion;
        k = k + 1;
    end
    j = j + 1;
end
end

```



4.4. Scrambling

La operación de scrambling consiste en codificar una secuencia binaria a_n mediante la operación lógica XOR bit a bit con otra secuencia binaria b_n de la misma longitud n , la secuencia resultante c_n será la encriptación de la secuencia original. Una característica importante de esta operación es su reversibilidad, es decir, si a la secuencia codificada c_n se le realiza un scrambling con b_n se recupera la secuencia original a_n .

Tabla 4.1. Operación lógica XOR.

Entradas		Salida
a_0	b_0	c_0
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

En LTE la secuencia b_n es de un tipo denominado Gold Sequence, estas secuencias generan poca correlación cruzada entre sí, lo que facilita la comunicación simultánea de varios dispositivos al reducir la interferencia.

Se puede generar una Gold Sequence mediante un método sencillo utilizando dos secuencias m siguiendo el siguiente diagrama:

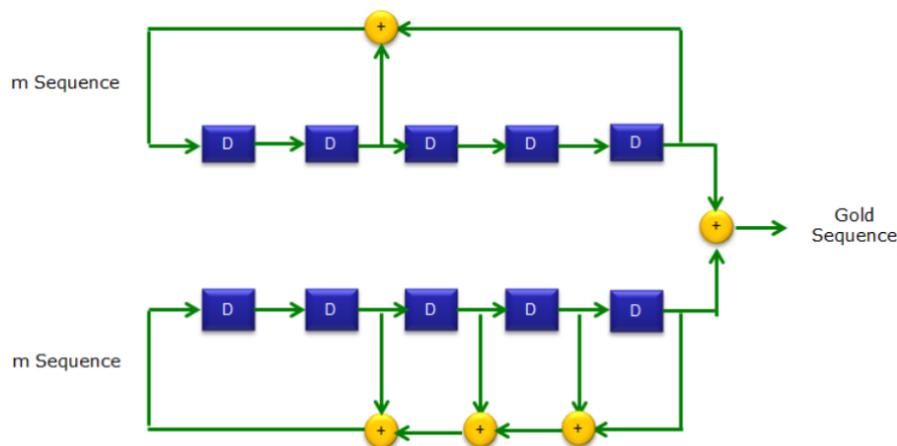


Figura 4.3 Diagrama de bloques para generar una Secuencia Gold [33].

Las secuencias m son un tipo de LFSR (Linear Feedback Shift Register) que se podrían incluir en el grupo de Códigos Convolutivos (ver 2.3) con la particularidad de tener sólo una salida. Las secuencias m se explicarán con más detalle (ver 3.3.2) puesto que son la base de la señal secundaria de sincronización en LTE.



A continuación, se muestra el código de Matlab implementado para generar la Gold Sequence:

```
function [c] = secuencia_gold(longitud,c_init)

%Valores fijos definidos en 36.211 7.2
x1_init = [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
Nc = 1600;

%c_init en 36.211 7.2, esto es lo que varía entre un canal y otro
x2_init = de2bi(c_init); %semilla de decimal a binario
diferencia = length(x1_init)-length(x2_init);
x2_init = [x2_init zeros(1,diferencia) ]; %se rellena con ceros

%Inicialización de las secuencias m auxiliares
x1 = zeros(1,Nc + longitud + 31);
x2 = zeros(1,Nc + longitud + 31);
x1(1:31) = x1_init;
x2(1:31) = x2_init;

%Inicialización de la secuencia gold
c = zeros(1,longitud);

%Primera secuencia m auxiliar
for n = 1 : (longitud+Nc)
    x1(n+31) = mod(x1(n+3) + x1(n),2);
end

%Segunda secuencia m auxiliar
for n = 1 : (longitud+Nc)
    x2(n+31) = mod(x2(n+3) + x2(n+2) + x2(n+1) + x2(n),2);
end

%Secuencia gold
for n = 1 : longitud
    c(n) = mod(x1(n+Nc) + x2(n+Nc),2);
end

end
```

Como se puede apreciar en el código se precisa de una precarga o semilla para generar las secuencias m. La primera de ellas está fijada por el estándar en el documento 36.211 apartado 7.2, sin embargo, la segunda varía en función de la secuencia a codificar. Esta segunda precarga puede estar ligada a un parámetro de broadcast o a una información específica de un usuario concreto, lo que permite encriptar secuencias de un tipo u otro.



5

Señales y canales físicos en Downlink

5.1. Primary Synchronization Signal (PSS)

Su misión es la de sincronizar el UE y el eNB además de proporcionar el número de celda para determinar la Physical Cell ID (o directamente Cell ID), la cual se utiliza para:

- Ubicar la posición de los pilotos de referencia, que el UE utiliza para realizar una estimación del canal.
- Decodificar datos comunes de celda.

Hay 3 tipos de secuencias PSS que directamente constituyen el valor del número de celda (0, 1 o 2), con este número y el grupo de celda (proporcionado por la SSS) se calcula el Cell ID con la operación:

$$Cell_{ID} = 3 * G_{celda} + N_{celda} \quad (5.1)$$

La P-SS se constituye en frecuencia mediante 62 valores de una secuencia Zadoff – Chu, esta secuencia pertenece al grupo de las Zero Autocorrelation (Golay, Barker...), secuencias en las que las posiciones de autocorrelación distintas al 0 proporcionan valores muy pequeños, mientras que para la autocorrelación en el 0 se obtiene un valor muy elevado. Esto permite mediante un umbral o threshold un mecanismo de sincronización con buena resiliencia frente al ruido.

Una propiedad en las secuencias Zadoff-Chu es que todos los elementos de la secuencia tienen el mismo valor en amplitud, siendo la fase la que varía entre ellos, lo cual permite reducir el PAPR. La construcción del P-SS se realiza con las siguientes fórmulas:

$$d_u(n) = \exp\left(\frac{-j\pi un(n+1)}{63}\right), \quad para n = 0,1, \dots, 30 \quad (5.2)$$

$$d_u(n) = \exp\left(\frac{-j\pi un(n+1)(n+2)}{63}\right), \quad para n = 31,32, \dots, 61 \quad (5.3)$$

Dónde **u** es el índice en la raíz de la secuencia Zadoff-Chu, el cual depende del número de celda:

- **u** = 25 si $N_{celda} = 0$
- **u** = 29 si $N_{celda} = 1$
- **u** = 34 si $N_{celda} = 2$



El UE debe detectar el P-SS sin ningún conocimiento a priori del canal, por lo que requiere de correlación no coherente. Se emplea un detector de máxima verosimilitud para encontrar el timing offset que corresponde al máximo de la autocorrelación.

La P-SS se mapea en las 31 primeras subportadoras a cada lado de la subportadora de DC (La subportadora a la frecuencia central RF a la cual transmite eNB, en LTE no lleva información ya que se utiliza como referencia en el RG) distribuyendo así sus 62 valores en 62 subportadoras, incluye además 5 subportadoras reservadas a cada lado por lo que ocupa un total de 72 subportadoras, expandiéndose sobre 6 RBs. Esto permite demodular P-SS (así como S-SS ya que tiene la misma estructura) con una DFT en el receptor de tamaño 64.

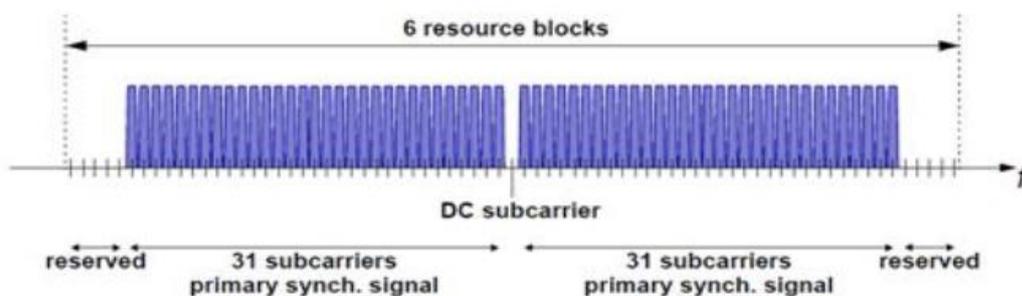
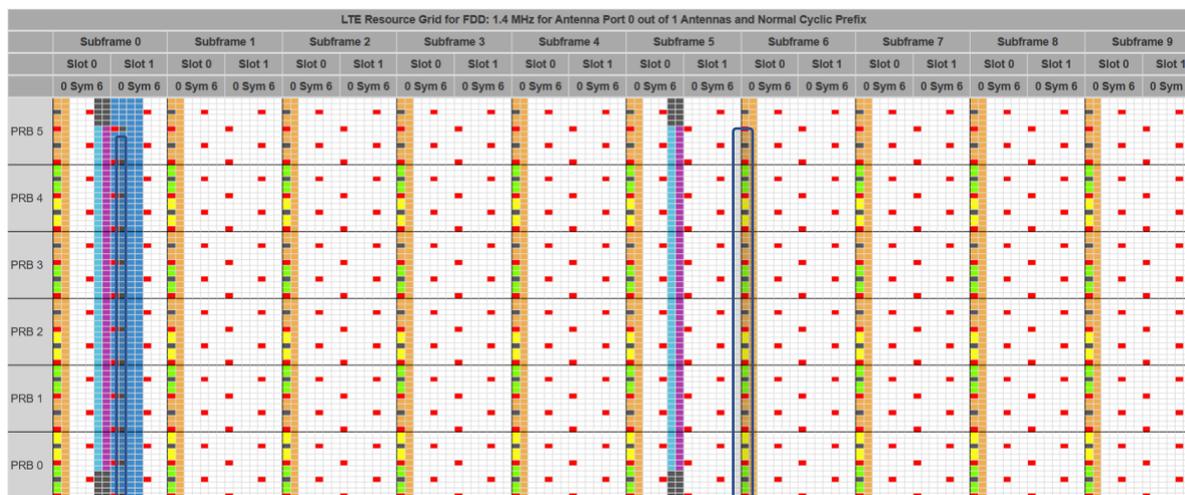
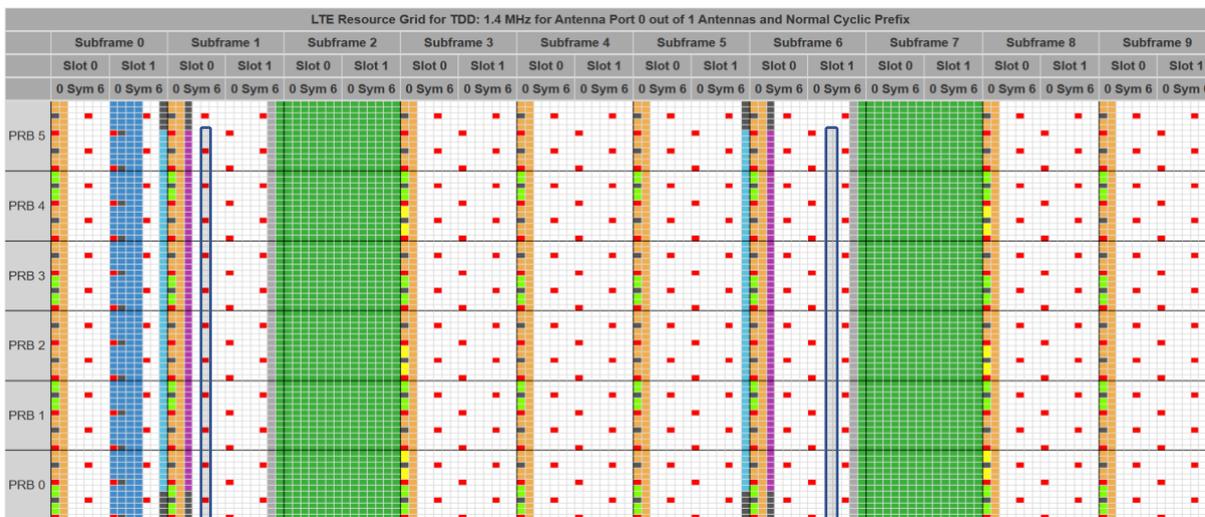


Figura 5.1 Subportadoras OFDM de P-SS en Downlink [34].

El símbolo OFDM en el cual se transmite el PSS depende del tipo de configuración Downlink/Uplink, en tipo 1 (FDD) se asigna a el último símbolo OFDM de los slots 0 y 10 mientras que en configuración tipo 2 (TDD) se asigna a el tercer símbolo OFDM de las subtramas 1 y 6. El P-SS por tanto se retransmite cada 5 ms.



(a)



(b)

Figura 5.2 Ubicación de PSS en los RGs de ejemplo: (a) Configuración FDD (b) Configuración TDD.

5.2. Secondary Synchronization Signal (SSS)

La SSS proporciona al usuario el número de subtrama, la multiplexación Uplink/Downlink y el grupo de celda (valores entre 0 y 167). Está constituida por dos secuencias M, secuencias binarias pseudoaleatorias que pueden ser generadas mediante un desplazamiento cíclico de M registros, obteniéndose una secuencia de longitud $2M - 1$.

Cada secuencia S-SS se genera mediante el interleaving en el dominio de la frecuencia de dos códigos de tamaño 31 modulados en BPSK, denotados como SSC1 y SSC2. Estos dos códigos son dos desplazamientos cíclicos de la misma M-sequence de tamaño 31, el desplazamiento depende del grupo de celda. La SSS indica el número de subtrama al UE mediante la concatenación de los códigos, en una transmisión utilizando SSC1-SSC2, y en la siguiente transmisión (tras 5 ms) SSC2-SSC1.

Para cada transmisión se realiza un scrambling de SSC2 con una secuencia que depende del grupo de celda, tras esto se agrupa con SSC1 y se realiza un segundo scrambling con otra secuencia que depende del número de celda, la generación de la SSS se plasma en la Figura 5.3.

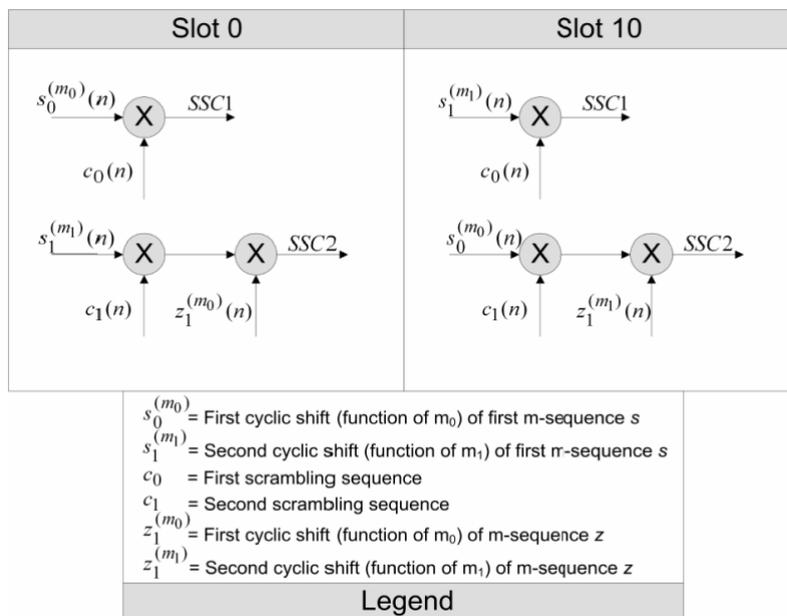


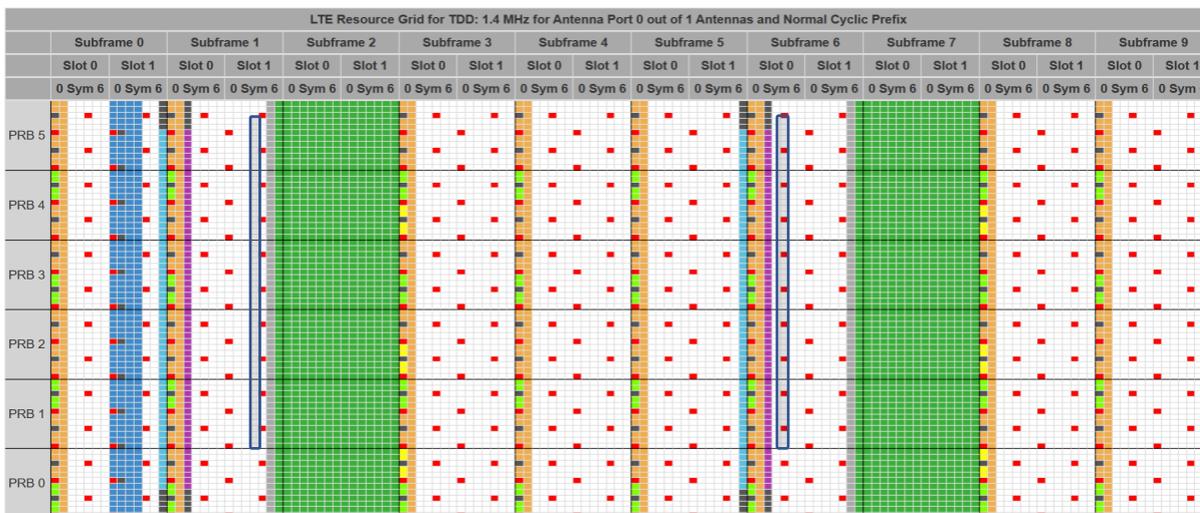
Figura 5.3 Esquema de la generación de la señal SSS [35].

La SSS es equivalente al P-SS en cuanto al tamaño en el RG, ocupa 72 subportadoras centradas sobre la subportadora de DC durante un símbolo OFDM, con 5 subportadoras reservadas a cada lado, y se asigna a símbolos OFDM cercanos a los que transmiten la PSS.

Para una configuración Downlink/Uplink tipo 1 se sitúan en el símbolo OFDM anterior al asignado para P-SS, en tipo 2 se sitúan en cambio 3 símbolos antes de P-SS. El S-SS, esto permite al UE conocer la configuración Downlink/Uplink al decodificar la SSS.



(a)



(b)

Figura 5.4 Ubicación de SSS en los RGs de ejemplo: (a) Configuración FDD (b) Configuración TDD.

5.3. Reference Signals (RS)

En LTE se definen tres tipos de señales de referencia:

- **Específicas de celda**, están disponibles para todos los UE de una celda y su ubicación en el RG está prefijada.
- **Específicas de usuario**, se encuentran incluidas entre los datos específicos destinados a cada usuario.
- **Específicas de MBSFN**, sólo se utilizan en Multimedia Broadcast Single Frequency Networks.

Todas las RSs están moduladas en QPSK para asegurar una baja PAPR en transmisión.

5.3.1. Específicas de celda

Para un sistema basado en OFDM, una distribución equidistante de los símbolos de referencia en el RG proporciona el menor error cuadrático medio en la estimación del canal. Estas RS se representan en el RG de ejemplo como los REs de color rojo distribuidos de forma periódica por todo el RG.

El estándar LTE ha sido concebido para trabajar bajo situaciones de alta movilidad por parte del UE, por lo que precisa de robustez frente al efecto Doppler. El espacio temporal entre símbolos de referencia requerido se calcula considerando la máxima dispersión Doppler, asociada a la mayor movilidad del UE frente a la estación base. En LTE está considerada 500 km/h.



La desviación en frecuencia por el efecto Doppler se calcula con $f_d = f_c \frac{v}{c}$, donde f_c es la frecuencia de la portadora, v es la velocidad del UE en metros por segundo y c es la velocidad de la luz.

Suponiendo una frecuencia de portadora de 2 GHz y la velocidad máxima estipulada de 500 km/h se obtiene una desviación en frecuencia de 950 Hz. De acuerdo con el teorema de muestro de Nyquist el mínimo periodo de muestreo para poder reconstruir el canal es de $T_c = \frac{1}{2f_d} = 0.5263$ (s), por lo que es necesario transmitir dos símbolos de referencia por slot (0.5 ms) en el dominio del tiempo para estimar el canal correctamente.

En el dominio de la frecuencia hay un símbolo de referencia cada seis subportadoras (únicamente en los símbolos OFDM que llevan símbolos de referencia), sin embargo, a nivel de RB están ubicados de tal forma que se transmitan cada 3 subportadoras. Este espaciado está relacionado con la coherencia del ancho de banda esperada del canal que a su vez está relacionada con la dispersión del retardo del canal.

El Downlink en LTE ha sido específicamente diseñado para trabajar con múltiples antenas en transmisión, los patrones de las RS están definidos para múltiples puertos de antena en el eNB. Un puerto de antena puede en la práctica ser implementado como un único puerto de antena para transmisión o como una parte en la combinación de múltiples puertos.

Se pueden utilizar hasta 4 puertos de antena en el eNB por celda, por tanto, el UE debe ser capaz de estimar hasta cuatro canales paralelos ya que por cada puerto se diseña un patrón RS con la intención de minimizar la interferencia intra-celda entre múltiples puertos de antena.

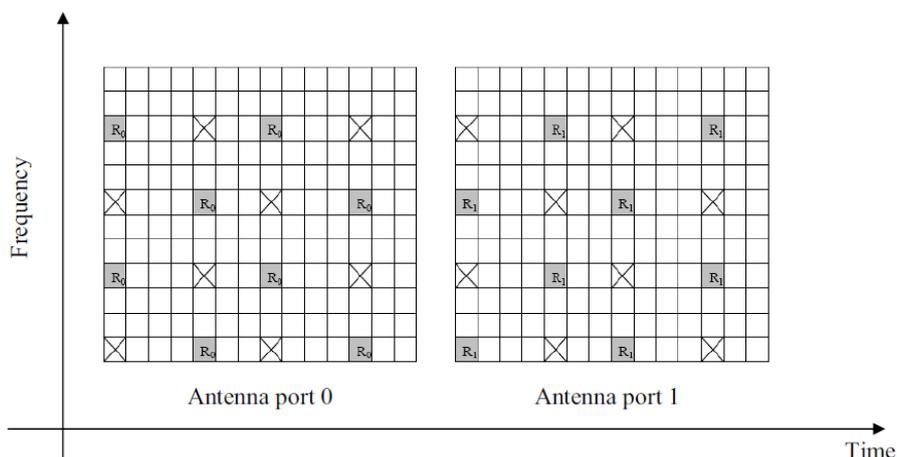


Figura 5.5 REs destinados para señales de referencia específicas de celda en un RB, para el caso de transmisión mediante 2 puertos de antena [36].

Tal y como se aprecia en la figura 5.5 para evitar interferencias en un canal de comunicación MIMO, no se puede transmitir datos en los REs reservados para la transmisión de las señales de referencia específicas de celda de otros puertos de antena. La señal RS específica de celda se calcula:



$$r_{l,n_s} = \frac{1}{\sqrt{2}} [1 - 2c(2m)] + j \frac{1}{\sqrt{2}} [1 - 2c(2m + 1)] \quad (5.4)$$

Dónde m es el índice de la RS, n_s es el número de slot y l es el número de símbolo en ese slot. La función c representa una secuencia tipo Gold de longitud 31 cuyos valores de iniciación dependen del tipo de RS específica de celda.

La secuencia RS específica de celda también lleva de manera implícita la Physical Cell ID. Esto es debido a que para cada RS específica de celda se emplea una desviación en frecuencia en concreto, dada por el número de Physical Cell ID en módulo 6, lo que permite evitar colisiones de RS comunes de hasta seis celdas adyacentes.

5.3.2. Específicas de usuario

Las RS específicas de usuario se envían sobre el PDSCH, para los UE que están específicamente configurados (por señalización RRC de capas superiores) para recibir las transmisiones Downlink en este modo. La intención es que el UE las utiliza para demodular los datos correspondientes a su PDSCH.

Las RS específicas de usuario se tratan como retransmisiones por un puerto de antena diferente con su propia respuesta al impulso. Un caso típico de uso es el de permitir “beamforming” en las transmisiones de datos para UEs específicos. Por ejemplo, en vez de utilizar más antenas físicas para la transmisión de otros RS específicos de usuario, el eNB puede emplear un array de antenas para generar un ancho de haz estrecho en la dirección de un UE específico.

5.4. Physical Broadcast Channel (PBCH)

El PBCH se encarga únicamente de transportar el Master Information Block (MIB), el cual contiene información de los parámetros esenciales para que el UE pueda acceder a la celda LTE. Está compuesto por 24 bits:

- **3 bits**, para especificar el ancho de banda del sistema.
- **3 bits**, con información del canal PHICH:
 - **1 bit**, para indicar la duración del PHICH (normal o extendida).
 - **2 bits**, para indicar el Ng (Number Group).
- **8 bits, para especificar el SFN (System Frame Number).**
- **10 bits, reservados para uso futuro.**

La generación del PBCH es la siguiente:

1. **Generación del CRC**, se genera un código de redundancia cíclico de 16 bits y se le aplica un scrambling con una máscara específica de la antena.
2. **CRC con MIB**, el CRC se añade al MIB conformando un paquete de 40 bits (24 + 16).
3. **Convolution encoding**, se codifica el paquete con un código convolucional (1/3) para control de errores obteniéndose 3 cadenas de 40 bits cada una.



4. **Rate matching**, se repite la cadena de 120 bits (40 x 3) 16 veces hasta conseguir 1920 bits.
5. **Scrambling**, se realiza un scrambling de esos 1920 bits con una secuencia de otros 1920 bits.
6. **Modulation (QPSK)**, se modula en QPSK obteniéndose 960 símbolos complejos.

En la primera trama se envían los 240 primeros símbolos OFDM, en las sucesivas tramas se envían los siguientes hasta completar los 960 en la cuarta trama. Después el MIB puede cambiar, retransmitiéndose otros 960 símbolos OFDM. Cada bloque de 240 es auto decodificable por el UE, por lo que generalmente se dice que el MIB se repite cada 10 ms, pudiendo cambiar de contenido cada 40 ms.

El PBCH ha de ser decodificado por el UE sin más información que la frecuencia de la subportadora de DC, obtenida mediante la decodificación de las señales de sincronización, por tanto, el PBCH se mapea también sobre las 72 subportadoras centrales de los símbolos OFDM.

Para cualquier configuración Downlink/Uplink el PBCH siempre ocupa los primeros 4 símbolos OFDM del slot 1, y aunque se extiende hasta 72 subportadoras, no ocupa los REs destinados a RSs.

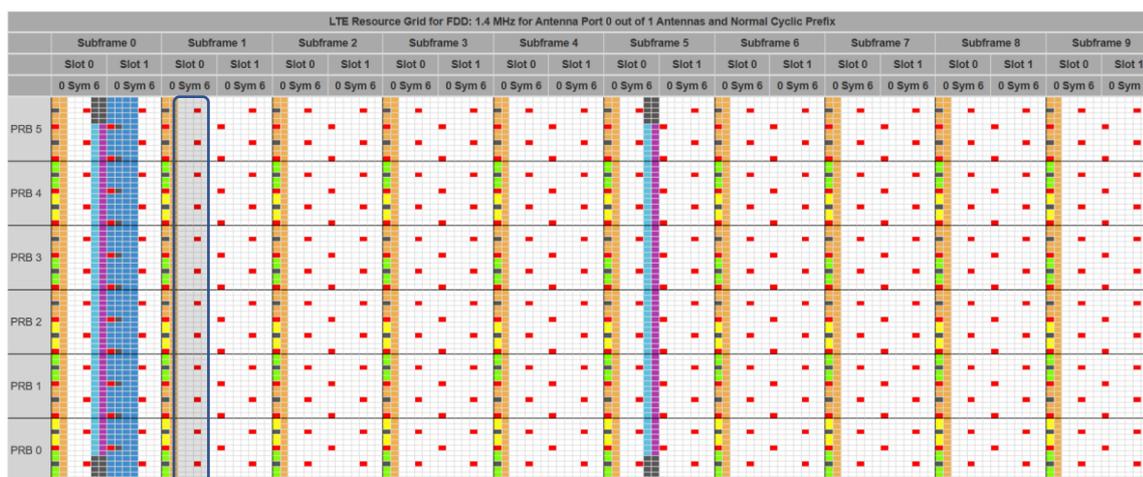


Figura 5.6 Ubicación del PBCH en el RG de ejemplo.

5.5. Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)

Como su propio nombre indica, el PCFICH es el canal físico que transporta el CFI (Control Format Indicator). El CFI es un indicador para el UE que puede tomar 3 valores (hay un cuarto reservado para uso futuro), los cuales indican directamente el número de símbolos OFDM que ocupa el canal de control PDCCH en cada subtrama. Cada valor del PCFICH está representado por una palabra código (codeword) de 32 bits [37].

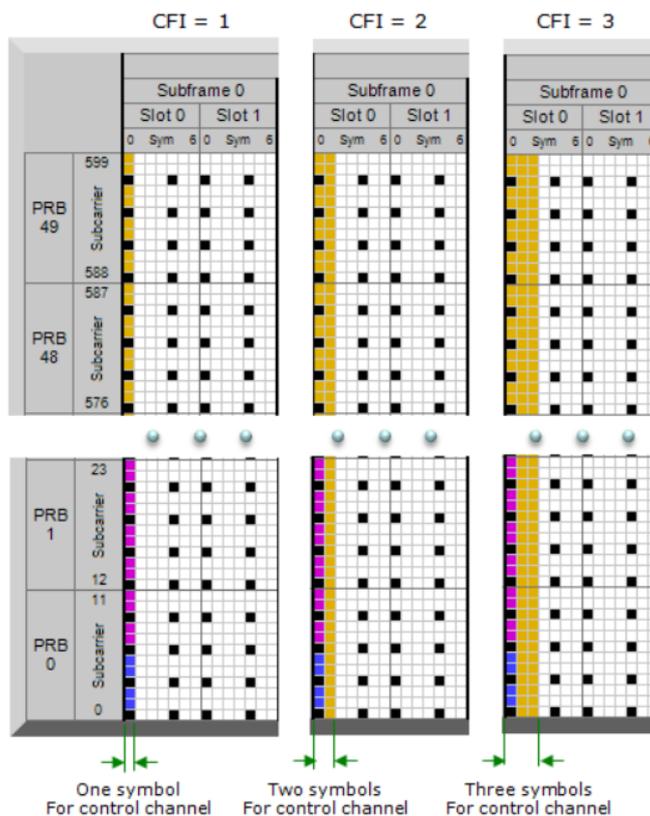


Figura 5.7 Tamaño del PDCCH en función del valor del CFI.

El PCFICH es transmitido en el mismo set de puertos de antena que el PBCH. Para minimizar la posibilidad de confusión en el UE con un PCFICH de una celda vecina, se emplea un offset en frecuencia específico por celda en los REs que transportan el PCFICH, este offset depende el Physical Cell ID, además se aplica un scrambling específico de celda a cada codework.

Está compuesto por 32 bits, con 3 combinaciones para cada posible valor del CFI, la secuencia se modula en símbolos QPSK, pudiendo transmitir el PCFICH en 16 REs.

Tabla 5.1. Codewords para cada valor de CFI.

CFI	Codeword
1	<0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1>
2	<1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0>
3	<1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1>
4 (Reservado)	<0,0>



Como norma generalista, 3GPP recomienda usar un CFI de 3 para anchos de banda de sistema de 1.4,3 y 5 MHz, y un CFI de 2 para anchos de banda de sistema de 10, 15 y 20 MHz.

Independientemente del ancho de banda del Sistema o del tipo de trama utilizada, el PCFICH es siempre transmitido por 4 grupos de REs (REGs) de 4 REs cada uno, ubicados en el primer símbolo OFDM de cada subtrama.

La ubicación exacta de estos grupos dentro del símbolo OFDM está determinada por la Physical Cell ID y el ancho de banda del sistema de acuerdo con:

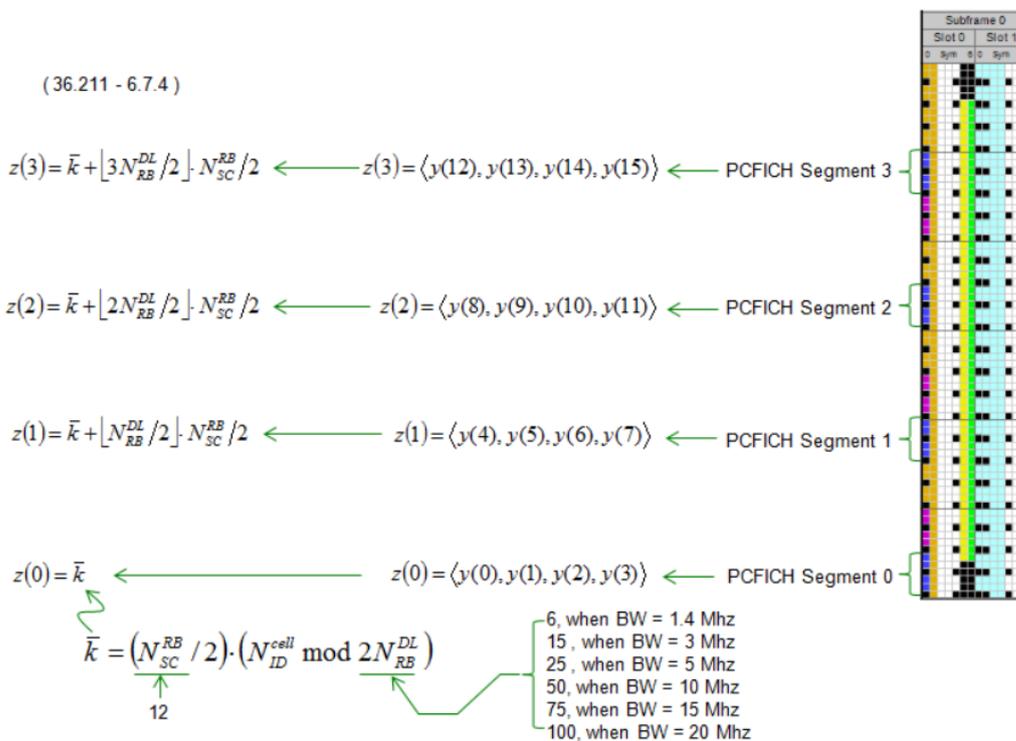


Figura 5.8 Posiciones de los REGs que conforman el PCFICH en el RG [38].

5.6. Physical HARQ Indicator Channel (PHICH)

El PHICH es el canal físico de Downlink encargado de retransmitir el HARQ (ACK o NACK), indicando si el eNB ha recibido correctamente el PUSCH del UE. Cada indicador HARQ está repetido en 3 símbolos BPSK [39].

Un PHICH se retransmite en varios Resource Elements Groups (REGs) en el primer símbolo OFDM de cada subtrama, es decir, en la misma “columna” que el PCFICH.

Se pueden transmitir varios PHICH en el mismo set de REGs y estos PHICH se denominan un grupo PHICH, los cuales están multiplexados con códigos ortogonales. Para identificar



un PHICH específico dentro de estos grupos es necesario conocer el número de grupo y los índices del código ortogonal.

El MIB en el PBCH especifica un par de características del PHICH, la primera es el tipo de prefijo cíclico (normal o extendido) y el N_g , el cual determina cuantos PHICH pueden pertenecer a un grupo PHICH. Ambos condicionan la secuencia ortogonal.

- El MIB contiene 2 parámetros que modifican el canal PHICH.
 - Extensión.
 - N° de grupos PHICH.
- Cada mensaje HARQ está compuesto por 3 REG ($3 \times 4 = 12$ subportadoras) pasos:
 - HARQ Indicator
 - 1 ACK
 - 0 NACK
 - Repetición
 - 111 ACK
 - 000 NACK
 - Secuencia ortogonal
 - Cada bit se reemplaza por una secuencia ortogonal

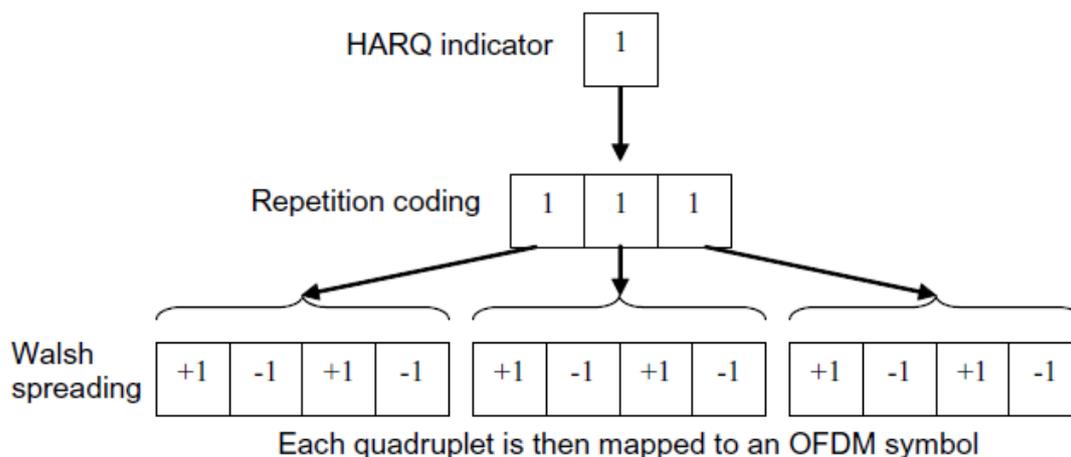


Figura 5.9 Codificación HARQ en LTE [17].

Tabla 5.2.



Secuencias ortogonales para PHICH.

n_{PHICH}^{seq}	CP normal	CP extendido
0	<+1 +1 +1 +1>	<+1 +1>
1	<+1 -1 +1 -1>	<+1 -1>
2	<+1 +1 -1 -1>	<+j +j>
3	<+1 -1 -1 +1>	<+j -j>
4	<+j +j +j +j>	-
5	<+j -j +j -j>	-
6	<+j +j -j -j>	-
7	<+j -j -j +j>	-

- El número de grupo PHICH indica el número de secuencias ortogonales multiplexadas sobre un REG
 - FDD

$$N_{PHICH}^{group} = \begin{cases} \left\lceil N_g \left(\frac{N_{RB}^{DL}}{8} \right) \right\rceil & \text{para CP normal} \\ 2 * \left\lceil N_g \left(\frac{N_{RB}^{DL}}{8} \right) \right\rceil & \text{para CP extendido} \end{cases} \quad (5.5)$$

Dónde N_g es el valor contenido en el MIB

- TDD

Para este caso el número de secuencias ortogonales multiplexadas será $N_{PHICH}^{group} \cdot m_i$ dónde m_i se obtiene de la siguiente Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Número de secuencias ortogonales PHICH mutiplexadas en TDD para cada subtrama.

Configuración Downlink/Uplink	Subtrama i									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2	1	-	-	-	-	2	1	-	-
1	0	1	-	-	-	1	0	1	-	1
2	0	0	-	1	1	0	0	0	1	0
3	1	0	-	-	-	-	0	0	1	1
4	0	0	-	-	-	0	0	0	1	1
5	0	0	-	0	0	0	0	0	1	0
6	1	1	-	-	-	-	1	1	-	1



- Cada REG se distribuye por los símbolos OFDM permitidos para el canal PHICH:
 - PHICH duración normal
 - Primer símbolo OFDM de la subtrama
 - PHICH duración extendida
 - Todos los Símbolos OFDM especificados en el CFI.
- El número de tripletos REG permitidos en una subtrama viene dado por la siguiente Tabla 5.4:

Tabla 5.4. Número de REG permitidos para cada ancho de banda y número de grupo PHICH.

$N_{RB} n_g$	1/6	1/2	1	2
6 (1.4 MHz)	1	1	1	2
12 (3 MHz)	1	1	2	4
25 (5 MHz)	1	2	4	7
50 (10 MHz)	2	4	7	13
75 (15 MHz)	2	5	10	19
100 (20 MHz)	3	7	13	25

5.7. Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

El canal PDCCH es el encargado de transmitir los DCI, estos son paquetes de información asociados a mensajes en el canal de datos PDSCH. Los DCI son necesarios para extraer el mensaje del canal PDSCH, puesto que contienen la ubicación de los símbolos IQ que conforman el mensaje, así como su modulación y codificación [39].

Se sitúa en las subportadoras que componen los n (especificado en el CFI) primeros símbolos OFDM de la subtrama, no ocupadas por ningún otro canal de control. Por ello una vez identificados los símbolos IQ destinados a los canales PHICH y PCFICH se conoce por descarte los símbolos IQ que conforman el canal PDCCH.

El canal PDCCH al igual que los otros canales de control PHICH y PCFICH emplea una estructura de Resource Element Groups (REG) como unidad mínima de transporte. Los REG están compuestos por 4 Resource Elements disponibles consecutivos en frecuencia, es decir, están compuestos por 6 subportadoras consecutivas en frecuencia de las cuales 2 están reservadas para la transmisión de pilotos tal y como se puede apreciar en la figura 4.1.3.1.

A su vez en el canal PDCCH estos REG se agrupan en Control Channel Elements (CCE) los cuales son grupos de 9 REGs ($9 \times 4 = 36$ subportadoras).

En Downlink existen 4 niveles de agregación, cada uno de estos especifica el número de bits necesarios para mapear un DCI en el canal PDCCH (Tabla 5.5).



Tabla 5.5. Niveles de agregación en PDCCH.

Nº CCEs	Nº REGs	Nº bits
1	9	72
2	18	144
4	36	288
8	72	576

El nivel de agregación empleado es seleccionado por el eNB en función de varios parámetros como la importancia de dicha información o la capacidad, por ejemplo, un DCI formato 1A para un ancho de banda de 10 MHz y multiplexación FDD ocupa 37 bits tal y como se puede apreciar en la Figura 5.10.

Format 1A (Release 13) - RA-RNTI, P-RNTI, or SI-RNTI		
Field Name	Length (Bits)	Comment
Flag for format0/format1A differentiation	1	
Localized/Distributed VRB assignment flag	1	
N_Gap	1	Applicable only when Localized/Distributed VRB assignment flag is 1 (Distributed) and BW >= 10 Mhz 0 = N-Gap 1 1 = N-Gap 2
Resource block assignment for Localized DRB	5 (1.4 Mhz) 7 (3 Mhz) 9 (5 Mhz) 11 (10 Mhz) 12 (15 Mhz) 13 (20 Mhz)	See 36.213 8.1
Resource block assignment for Distributed DRB	5 (1.4 Mhz) 7 (3 Mhz) 9 (5 Mhz) 10 (10 Mhz) 11 (15 Mhz) 12 (20 Mhz)	
MCS	5	
HARQ Process	3 (FDD) 4 (TDD)	
NDI	1	Applicable only if DL BW >= 5 Mhz and Localized/Distributed VRB assignment flag is set to 1
RV	2	
TPC (MSB)	1 (Reserved)	
TPC (LSB)	1	If least significant bit is 0 then $N_{PRB}^{1A} = 2$ else $N_{PRB}^{1A} = 3$
Downlink Assignment Index	X	Set only in TDD See 36.212 - Table 5.3.3.1.2-2 See DAI page for the details of DAI concept
HARQ-ACK resource offset	2	Set only when DCI is carried by EPDCCH

Figura 5.10 Estructura DCI formato 1A [40].

Tras añadir el CRC de 16 bits el paquete total será de 53 bits, ahora el eNB tendrá que decidir que nivel de agregación desea usar para el mensaje teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:



- Peor escenario posible, este factor es el que más pesa en los DCI “Common” destinados a transportar mensajes como SIB, RAR (Random Access Response) o paginado, ya que ha de ser posible su decodificación para todos los usuarios sin importar la distancia en la celda. Por tanto se escogería un nivel de agregación 8 y se realizaría un Rate Matching de los 53 bits hasta alcanzar los 576 bits proporcionando una buena protección contra errores.
- CQI, este factor está basado en el Channel Quality Indicator enviado por el usuario en Uplink. Se utiliza para DCI “UE-Specific” dónde el mensaje esta destinado a un único usuario y por tanto se puede personalizar el nivel de agregación en función de la calidad del canal.

Un canal PDCCH es “UE-Specific” cuando los DCI que transporta están destinados a usuarios concretos, mientras que es “Common” si la información es broadcast, como por ejemplo en la transmisión de los DCI correspondientes a la decodificación de los SIB.

El UE a priori no sabe si la subtrama que está decodificando contiene DCI específicos de usuario o broadcast, ni tampoco sabe que información transportan dichos DCI. Para todo esto se emplea un número identificador denominado Radio Network Temporary Identifier (RNTI), los RNTI son números de 16 bits que modifican el CRC del DCI mediante una operación XOR tal y como muestra la siguiente figura.

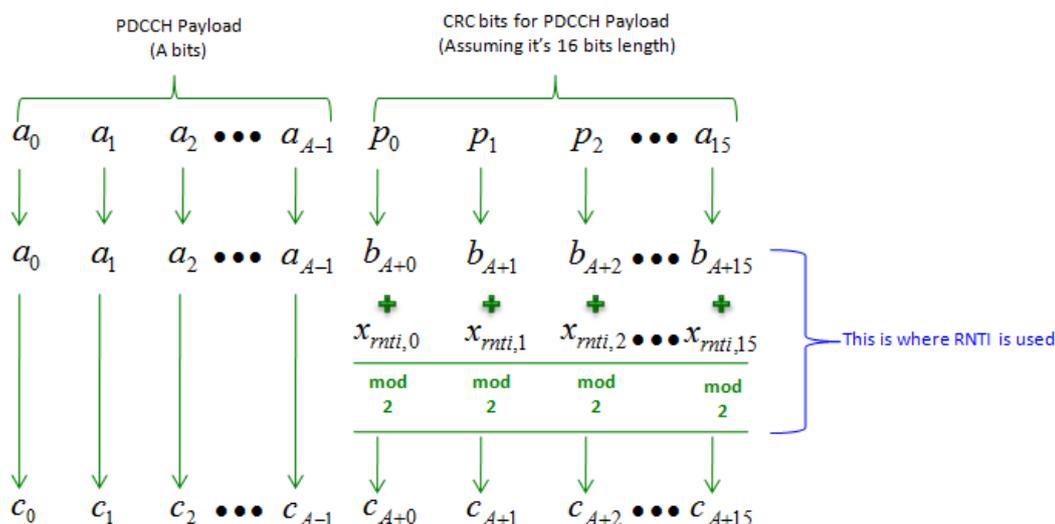


Figura 5.11 Scrambling RNTI con el CRC de un DCI [41].

Si se utiliza una técnica multi-antena, también se aplica una máscara de 16 bits específica de la antena transmisora sobre el resultado del CRC + RNTI.

Existen por tanto RNTI generales como el asociado a los SIB, denominado S-RNTI o el de la respuesta al preámbulo RAR, denominado RA-RNTI, y específicos para cada usuario denominados C-RNTI.

Un usuario por tanto debe decodificar el canal PDCCH hasta obtener la cadena de bits **C** especificada en la figura 4.1.6.3, aplicar un scrambling a los 16 últimos bits con el RNTI de



la información que desea obtener y comprobar que el CRC resultante sea correcto, en cuyo caso recupera el DCI que estaba buscando.

El problema es que, tal y como se ha comentado anteriormente, el canal PDCCH puede tener un nivel de agregación u otro, lo que se traduce no sólo en la multiplexación de varios DCI si no en la longitud del Rate Matching aplicado. Por tanto, el usuario debe realizar una decodificación “ciega” sin conocer como ha sido generado el canal y empleando un método de prueba y error.

Los pasos para codificar el canal PDCCH son los siguientes:

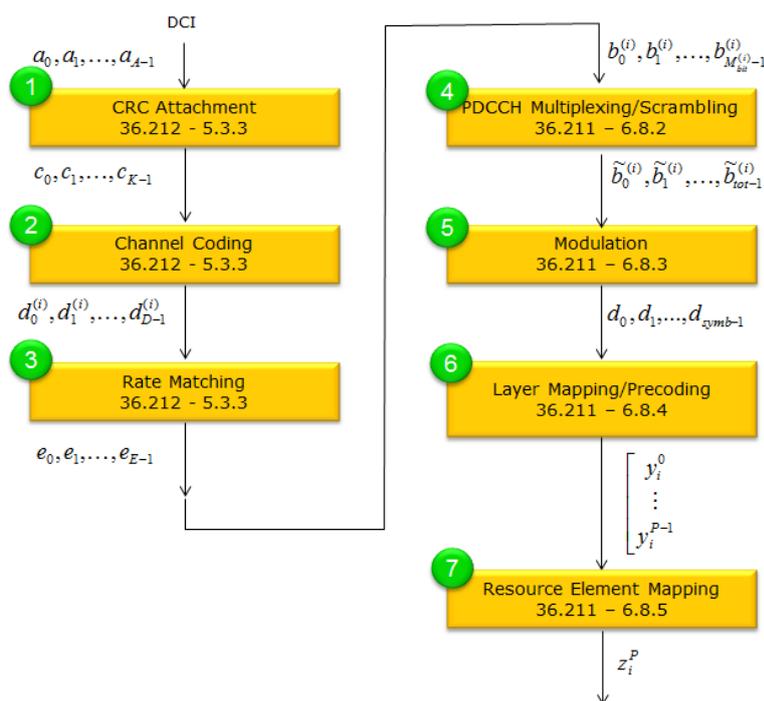


Figura 5.12 Codificación del canal PDCCH [42].

5.8. Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)

El PDSCH es el principal canal de datos en Downlink [43], se utiliza para transportar datos de cualquier usuario además de información broadcast del sistema mediante los SIBs (información del sistema que proviene de capas superiores, actualmente (en 2020) hay 24 bloques diferentes [44]). Los datos son transmitidos mediante unidades denominadas Transport Blocks (TPs), cada uno corresponde a una unidad de datos de la capa MAC (PDU). La capa MAC puede entregar a la capa física los TPs una vez cada 1 ms.

Cuando se utiliza para transmitir los datos de usuario, el PDSCH transmite en cada trama uno o dos TPs por UE como máximo, dependiendo del modo de transmisión seleccionado. Esta forma de transmisión también configura la técnica multi-antena empleada, existen siete modos:



- **Modo 1**, transmisión desde un único puerto de antena del eNB.
- **Modo 2**, diversidad en la transmisión.
- **Modo 3**, multiplexación espacial open-loop.
- **Modo 4**, multiplexación espacial closed-loop.
- **Modo 5**, Multi-User MIMO (MU-MIMO).
- **Modo 6**, closed-loop precodificado de rango 1.
- **Modo 7**, transmisión utilizando las señales de referencia específicas de usuario.

Con la excepción del modo 7, la referencia de fase para demodular el PDSCH viene dada por las señales de referencia específicas de celda. El número de puertos de antena empleados para transmitir el PDSCH es el mismo que para PBCH. En el modo 7 son las señales de referencia específicas de usuario las que proporcionan la referencia de fase para el PDSCH.

El modo de transmisión también afecta a la transmisión de los canales de control del Downlink, así como el feedback de la calidad del canal que proviene del UE.

Al igual que para los datos del PDSCH, se identifican los RBs destinados a la transmisión de información broadcast (SIBs) mediante mensajes de señalización del canal físico PDCCH. La identificación en el PDCCH no está referida a un UE específico, sino que se refiere a una identidad broadcast denominada System Information Radio Network Temporary Identifier (SI-RNTI), la cual conocen todos los UEs.

Otro uso especial del canal PDSCH es el de paginado, ya que no existe canal físico en LTE dedicado a este propósito. El indicador de página se transmite en el PDCCH mientras que el PDSCH es el que transmite la información de dicha página en un RB indicado por PDCCH. De forma similar a la transmisión de los SIBs, los indicadores de página del PDCCH utilizan un identificador que se refiere a el Paging RNTI (P-RNTI). En lugar de aportar diferentes indicadores de páginas para diferentes grupos de UE, son los UE los que monitorizan las diferentes subtramas en busca de sus mensajes de paginado.

El PDSCH se encarga de enviar un mensaje importante en el proceso de conexión del UE con una celda, dicho mensaje se denomina Random Access Response Message (RARM), el tiempo y localización del RARM en PDSCH se calcula según el tiempo y localización del Random Access Message (RAR) enviado por parte del UE en el PRACH, el cual contiene la identidad aleatoria del dispositivo con un Cell Radio Network Temporary ID (C-RNTI) que se empleará para todas las asignaciones de ancho de banda posteriores. El proceso del RAR y RARM se explicará más en detalle en el capítulo 4 de conexión.

5.8.1. Generación

PDSCH emplea un protocolo Adaptive Modulation and Coding (AMC) para reducir el consumo de potencia en periodos de baja actividad. El nivel de adaptación lo indica el parámetro MCD del DCI transportado por el PDCCH y consiste en:

- **Configuración de la modulación**, permite, en función de la Signal Noise Ratio (SNR), una modulación QPSK, 16QAM o 64QAM.



- **Tasa Binaria**, para una modulación concreta se puede escoger una tasa binaria en función de las condiciones del radiocanal, se consigue adaptación en la tasa mediante una técnica de puncturing.

Un algoritmo de Rate-Matching (RM) selecciona bits de la salida de un turbo coder tasa 1/3 mediante puncturing y/o repetición. Debido a que el número de bits a transmitir depende de los recursos físicos, el RM debería ser capaz de generar patrones de puncturing para tasas binarias arbitrarias. Por ello en LTE se ha escogido Circular Buffers (CBs) ya que generan patrones de puncturing flexibles y sencillos para cualquier tasa binaria con un buen rendimiento.

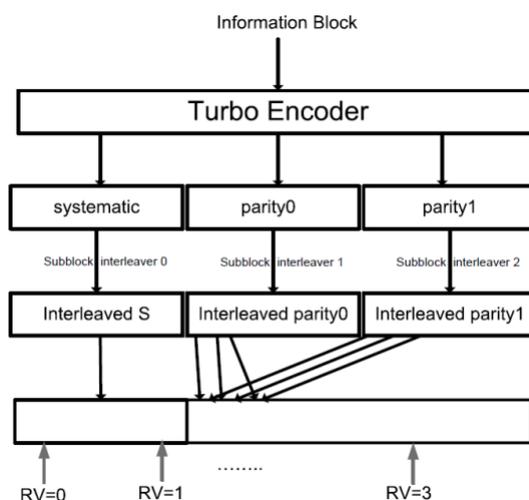


Figura 5.13. Algoritmo RM basado en un Circular Buffer [17].

Tal y como muestra la figura 5.13, cada uno de los tres flujos de salida del turbo coder (**systematic**, **parity0** y **parity1**) son reconstruidos con su propio interleaver. Las colas de 12 bits son también equidistribuidas en tres flujos, lo que genera sub-bloques de tamaño $K_s = K + 4$, dónde K es el tamaño del interleaver tipo Quadratic Permutation Polynomial (QPP).

Se genera un buffer de salida mediante la concatenación de los bits recompuestos del flujo **systematic** entrelazándolo con los otros dos flujos recompuestos de **parities**. Una Redundancy Version (**RV**) especifica el punto de inicio en el CB para poder empezar a leer los bits de salida. Normalmente el valor **RV** = 0 suele utilizarse para la transmisión inicial, enviándose así el mayor número de bits **systematic** posibles.

Los bits en las colas del turbo código son distribuidas de forma uniforme en los tres flujos, siendo todos los flujos del mismo tamaño. Cada sub-bloque del interleaver está basado en un interleaver fila-columna con 32 columnas y 32 filas.

Los bits de cada flujo se escriben fila a fila hasta completar la matriz de 32 columnas, tras esto se realiza una permutación de los bits por columna para generar la salida del interleaver:



[0, 16, 8, 24, 4, 20, 12, 28, 2, 18, 10, 26, 6, 22, 14, 30, 1, 17, 9, 25, 5,
21, 13, 29, 3, 19, 11, 27, 7, 23, 15, 31]

Indicando cada número la posición inicial pre-permutación en la columna.

El mapeo de los datos a los RBs puede llevarse a cabo de manera localizada o de manera distribuida. En la primera se ubican todos los REs disponibles en un par de RBs para un UE, esto es realizable en la mayor parte de los escenarios, incluyendo el uso de configuración dinámica de RBs según la calidad del canal a frecuencias específicas.

El mapeo de forma distribuida consiste en separar en frecuencia los dos RBs, esto es una manera sencilla de obtener diversidad frecuencial para pequeños tamaños de datos, que de otra forma habrían estado confinados en una parte estrecha del ancho de banda en Downlink, siendo más susceptibles al narrow-band fading.

Los REs que conforman el PDSCH son aquellos que no están reservados para ningún otro propósito, por lo que cuando la información de control indica al UE que un par de RBs en particular de una subtrama está asociado a ese usuario, se refiere a que son únicamente los REs disponibles en esos RBs los que transportan datos en el PDSCH.

Normalmente, la ubicación de los RBs para la transmisión del PDSCH de un UE específico está gestionada por el propio UE. Éste emplea señalización dinámica de control transmitida al inicio de la subtrama en el PDCCH.

Señales y canales físicos en Uplink

6.1. Demodulation Reference Signals (DM-RS)

Las señales de referencia DM-RS están asociadas a la transmisión de datos PUSCH y PUCCH, su función principal es la de estimación del canal para posibilitar una demodulación coherente y se encuentran en todos los slots del Uplink, existiendo dos alternativas [45]:

- **Un símbolo DM-RS por slot**, teniendo la misma duración que un símbolo de datos SC-FDMA (el cual se suele denominar Long Block (LB)) y el mismo espaciado entre subportadoras.
- **Dos símbolos DM-RS por slot**, cada uno de la mitad de duración de un símbolo de datos SC-FDMA (se suele denominar Short Block (SB)) y con el doble de espaciado entre subportadoras, lo que se traduce en sólo seis subportadoras por RB en los símbolos DM-RS.

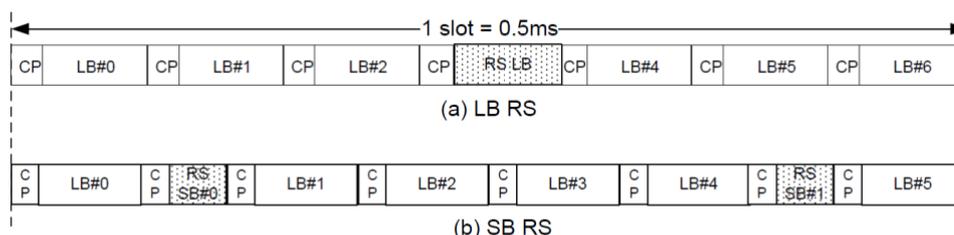


Figura 6.1. Ejemplo de slots para las alternativas de (a) un LB DM-RS por slot y (b) dos SBs DM-RS por slot [45].

El rendimiento de ambas alternativas es similar para velocidades de UE medias y empeora para LB DM-RS a velocidades de UE superiores de 250 km/h. Aun con esta pérdida de rendimiento la estructura de LB permite una parametrización de señal similar a la del Downlink y además proporciona secuencias mayores para un ancho de banda determinado (ya que tiene dos veces más subportadoras de DM-RS) por lo que es la alternativa escogida en LTE para transmitir las DM-RS en el PUSCH.

Las señales de referencia en Uplink de LTE están basadas principalmente en secuencias Zadoff-Chu. La longitud de la secuencia DM-RS (N_p) es igual a el número de subportadoras asignadas, el cual es múltiplo del número de subportadoras por RB (N_{sc}^{RB}) siendo este 12.

$$N_p = M_{sc}^{RS} = m \cdot N_{sc}^{RB}, \quad 1 \leq m \leq N_{RB}^{UL} \quad (6.1)$$



Dónde N_{RB}^{UL} es el ancho de banda del sistema del Uplink en términos de RBs. La longitud de la secuencia DM-RS se aplica directamente sin necesidad de DFTS a las N_p subportadoras de la entrada del IFFT tal y como se puede observar en la figura 6.2.

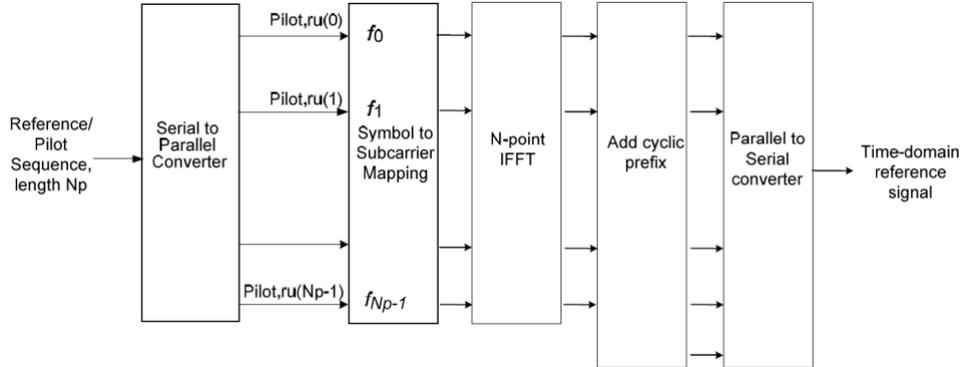


Figura 6.2. Estructura para transmisión de señales de referencia en SC-FDMA [17].

Recordando que una secuencia Zadoff-Chu de longitud impar N_{ZC} viene dada por:

$$a_q(n) = \exp \left[-j2\pi q \frac{\frac{n(n+1)}{2} + ln}{N_{ZC}} \right] \quad (6.2)$$

Dónde para LTE, $q = [1, 2, \dots, N_{ZC} - 1]$ es el índice de la secuencia, $n = [1, 2, \dots, N_{ZC} - 1]$ y $l = 0$. En LTE la N_{ZC} se escoge como el mayor número primo menor o igual que N_p . En el caso de ser menor, a la secuencia Zadoff-Chu de longitud N_{ZC} se le aplica una extensión cíclica hasta alcanzar la longitud N_p de la siguiente forma:

$$\bar{r}_q(n) = a_q(n \bmod N_{ZC}), \quad n = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (6.3)$$

La extensión cíclica en el dominio de la frecuencia mantiene propiedades de amplitud constante además de desviación cíclica ortogonal. Se emplean extensiones cíclicas de las secuencias Zadoff-Chu en lugar de truncamientos para obtener mejor PAPR. Para longitudes de secuencias de tres o más RBs esto proporciona al menos 30 secuencias con una PAPR menor o parecida a las de una QPSK.

Para longitudes de secuencia más cortas (uno o dos RBs) sólo se permite un número reducido de secuencias Zadoff-Chu para extensión cíclica (sólo hay 12 secuencias que proporcionan menor PAPR que una QPSK), por lo tanto, para poder proporcionar el mismo número de secuencias que en el caso anterior se definen 30 nuevas secuencias QPSK para DM-RS:

$$\bar{r}_q(n) = a_q(n \bmod N_{ZC}), \quad n = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (6.4)$$

Dónde M_{sc}^{RS} es el número de subportadoras en las que la secuencia está mapeada y los valores $\varphi(n)$ se encuentran en la página 30 y 31 de “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio



Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 11.0.0 Release 11)” [35]

La posición exacta de un símbolo DM-RS en el PUSCH para cada slot Uplink depende del uso de un CP normal o extendido. Para un CP normal ocupa el cuarto símbolo SC-FDMA, mientras que para uno extendido ocupa el tercer símbolo SC-FDMA.

En la transmisión del PUCCH la posición y el número de DM-RS dependen del tipo de información de control para Uplink. Ocupan los mismos RBs que las transmitidas en PUSCH por lo que la longitud de la secuencia DM-RS transmitida es igual al número de subportadoras destinadas para el UE en transmisiones PUSCH.

6.2. Sounding Reference Signals (SRS)

Las SRS no están relacionadas con los datos de Uplink o transmisiones de control, se utilizan principalmente para la estimación de la calidad del canal, lo que permite una configuración selectiva en frecuencia en Uplink [17]. Tienen además otros propósitos como el de control de potencia en transmisión.

El eNB puede pedir una transmisión SRS individual al UE o configurar el UE para transmitir SRS de forma periódica hasta su finalización. Hay un parámetro de señalización específico de UE de un bit de tamaño denominado “duration” que especifica si la transmisión ha de ser única o periódica.

Si se escoge un modo de transmisión periódica la periodicidad puede tomar los valores de 2, 5, 10, 20, 40, 80, 160 o 320 ms. El valor y el offset de subtrama para el cual tiene que transmitir la SRS están configurados por otro parámetro de señalización específico de UE de 10 bits de tamaño denominado “srsConfigurationIndex”

Para proporcionar configuración selectiva en frecuencia entre múltiples UEs es necesario que SRSs de diferentes UEs con anchos de banda distintos puedan solaparse. Para ello se emplea un Interleaved FDMA (IFDMA) para generar los símbolos SRS SC-FDMA, con un factor de repetición (RPF) de 2.

El RPF en el dominio del tiempo es equivalente a un factor de diezmado en frecuencia. Un RPF de 2 implica por tanto que la señal ocupa cada segunda subportadora en el ancho de banda de sounding proporcionado tal y como se puede observar en la figura 6.3.

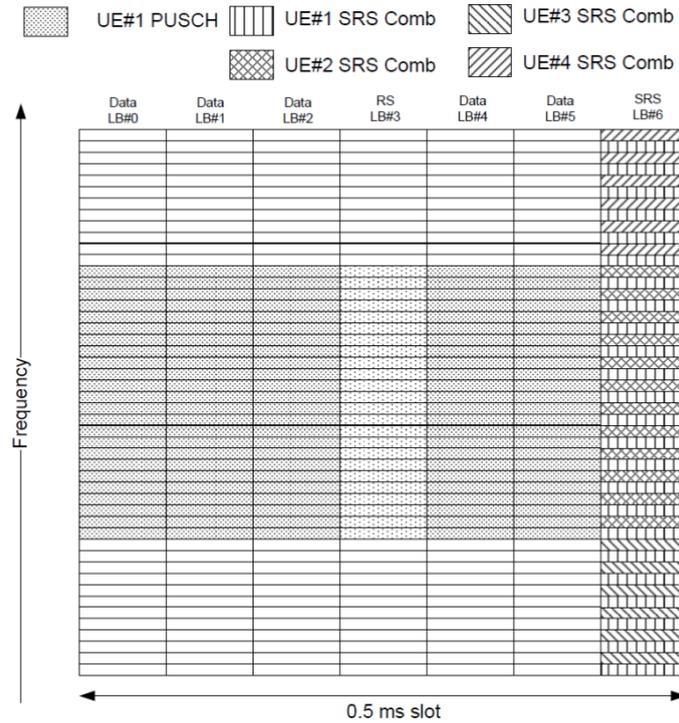


Figura 6.3. Estructura de símbolos SRS con RPF = 2 [17].

Las secuencias RS utilizadas para SRS son idénticas a las de DM-RS, con una longitud de la secuencia restringida a múltiplos de 2,3 y/o 5 veces el tamaño del RB. El ancho de banda en SRS debe ser un número par debido al RPF de 2 y al tamaño mínimo de secuencia SRS de 12, por lo que los posibles anchos de banda de STS N_{RB}^{SRS} (en número de RBs) y la longitud de secuencia M_{SC}^{SRS} vienen dadas por:

$$N_{RB}^{SRS} = 2^{(1+\alpha_2)} \cdot 3^{\alpha_3} \cdot 5^{\alpha_5} \quad (6.5)$$

$$M_{SC}^{SRS} = \frac{1}{2} \cdot N_{RB}^{SRS} \cdot 12 \quad (6.6)$$

Dónde α_2 , α_3 y α_5 son un set de enteros positivos. De manera similar a DM-RS, se pueden retransmitir varios SRS simultáneamente desde varios UEs utilizando los mismos RBs y el mismo offset mediante diferentes desviaciones cíclicas en el tiempo para lograr separación ortogonal. Para SRS se pueden realizar ocho desviaciones cíclicas en el tiempo por combinación SRS.

En la celda, las subtramas en las que se transmiten SRS de cualquier UE, están indicadas mediante señalización broadcast específica de celda. Un parámetro específico de celda de tamaño 4 bits denominado “srsSubframeConfiguration” indica 15 posibles sets de subtramas en las que se pueden transmitir SRSs en cada trama radio. Esta configurabilidad proporciona



flexibilidad para ajustar el overhead en SRS dependiendo del escenario. Existe una decimosexta configuración que apaga por completo SRS en la celda.

Las transmisiones de las SRS están siempre ubicadas en el último símbolo SC-FDMA de las subtramas configuradas, tal y como indica la figura 2.5.2. La transmisión de datos PUSCH no está permitida durante el símbolo SC-FDMA destinado para SRS lo que supone un peor caso de sounding overhead (un símbolo SRS en cada subtrama) de aproximadamente 7%.

6.3. Physical Uplink Control Channel (PUCCH)

La señalización de control que lleva el PUCCH se divide en [26]:

- Scheduling Requests (SRs).
- HARQ en respuesta a los paquetes de datos de Downlink en PDSCH.
- Channel Quality Indicator (CQI).

La cantidad de información de control que un UE puede transmitir en una subtrama depende del número de símbolos SC-FDMA disponibles para la transmisión de datos destinados para la señalización. PUCCH soporta siete formatos diferentes dependiendo de la información de señalización a transmitir.

PUCCH Format	Uplink Control Information (UCI)
Format 1	Scheduling request (SR) (unmodulated waveform)
Format 1a	1-bit HARQ ACK/NACK with/without SR
Format 1b	2-bit HARQ ACK/NACK with/without SR
Format 2	CQI (20 coded bits)
Format 2	CQI and 1- or 2-bit HARQ ACK/NACK (20 bits) for extended CP only
Format 2a	CQI and 1-bit HARQ ACK/NACK (20 + 1 coded bits)
Format 2b	CQI and 2-bit HARQ ACK/NACK (20 + 2 coded bits)

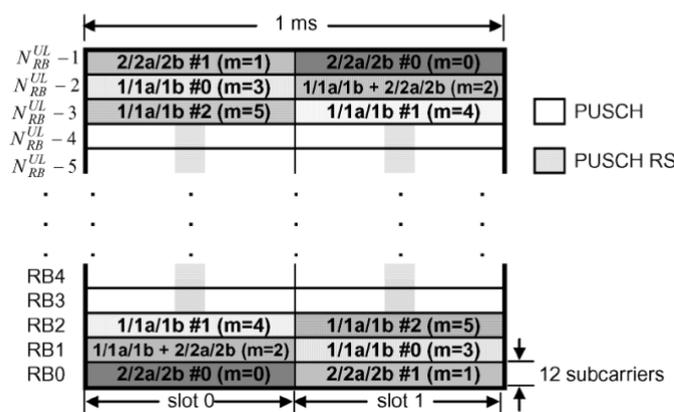


Figura 6.4. Mapeo de los formatos PUCCH sobre sus regiones o RBs [26].

6.3.1. Channel Quality Indicator (formato 2)

La estructura del canal para transmitir el CQI se muestra en la figura 6.5, los símbolos 1 y 5 se utilizan para la transmisión de las DM-RS (todo en el caso de un CP normal).

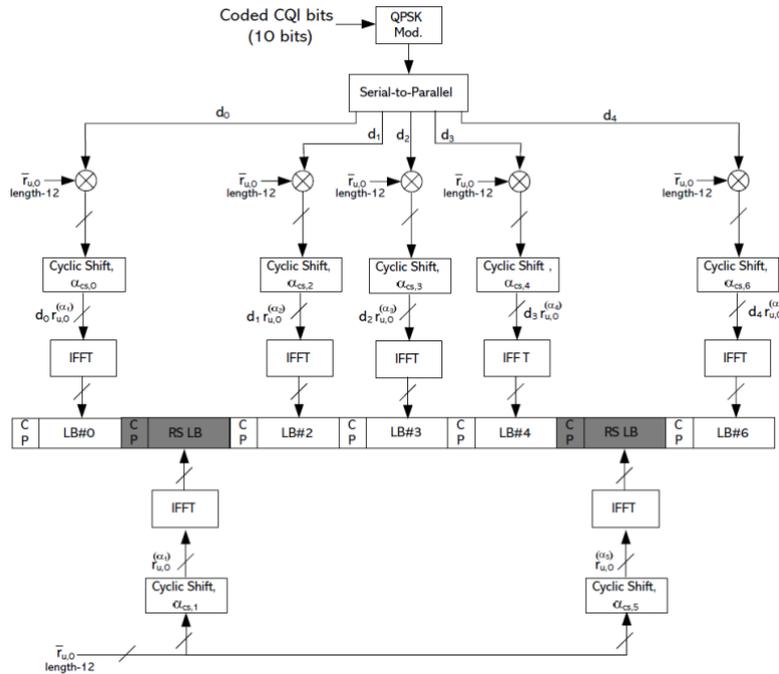


Figura 6.5. Estructura del canal para CQI, formatos PUCCH 2, 2a y 2b con un CP normal [46].

El número de símbolos RS por slot viene dado por el compromiso entre la precisión en la estimación del canal y una tasa de código soportable para la transmisión de los bits de señalización.

10 bits de información CQI se codifican con una tasa de $\frac{1}{2}$, tras esto se realiza puncturing con un código Reed-Muller (20, k) proporcionando 20 bits codificados, los cuales son posteriormente scrambleados (al igual que en PUSCH) antes de ser mapeados sobre QPSK.

Un símbolo QPSK es transmitido en cada uno de los 10 símbolos SC-FDMA de la subtrama, modulando un desviador temporal cíclico de longitud 12 previo a la OFDM. Los 12 desviadores temporales equiespaciados permiten la multiplexación ortogonal de 12 UEs diferentes en el mismo RB.

Para proporcionar aleatorización en las interferencias entre celdas, se emplean saltos cíclicos a nivel de símbolo específicos de celda. Un UE se configura de manera semi-estática (mediante señalización de capas superiores) para enviar de manera periódica diferentes tipos de CQI, PMI y RI en el CQI PUCCH, mediante un índice $n_{PUCCH}^{(2)}$, el cual indica la región PUCCH y la desviación cíclica en tiempo a usar. La región PUCCH m utilizada en la transmisión con formatos 2/2a/2b y la desviación cíclica n_{PUCCH} están dadas por:

$$m = \left\lfloor \frac{n_{PUCCH}^{(2)}}{12} \right\rfloor \quad (6.7)$$

$$n_{PUCCH} = n_{PUCCH}^{(2)} \bmod 12 \quad (6.8)$$



6.3.2. Hybrid Asynchronous (formatos 1a/1b)

La estructura del canal PUCCH para la transmisión del HARQ sin CQI se representa en la figura 6.6 para un slot con CP normal. Tres (dos en caso de CP extended) símbolos SC-FDMA se emplean en mitad del slot para la transmisión de las RS, transmitiéndose los ACK/NACK con los cuatro símbolos restantes [47].

Debido a los pocos bits utilizados para transmitir ACK/NACK, los tres símbolos RS se emplean para mejorar la precisión en la estimación del canal, lo que permite operar en un entorno de SNR más baja que en el caso de transmitir sólo el CQI.

La transmisión HARQ soporta modulaciones BPSK (ACK/NACK de 1 bit) o QPSK (ACK/NACK de 2 bits) lo que se traduce en un único símbolo HARQ. Las modulaciones se realizan de la misma forma que en el caso de estar multiplexado con el CQI (formatos 2a/2b).

El símbolo modulado en BPSK o QPSK (cuya fase esta rotada 90° en el segundo slot) es transmitido en cada símbolo SC-FDMA, modulando un desviador cíclico en tiempo de longitud 12 previo a la OFDM. Se utiliza además una dispersión temporal con códigos ortogonales (Walsh-Hadamard o DFT) para multiplexar a los UE por código, frecuencia y tiempo.

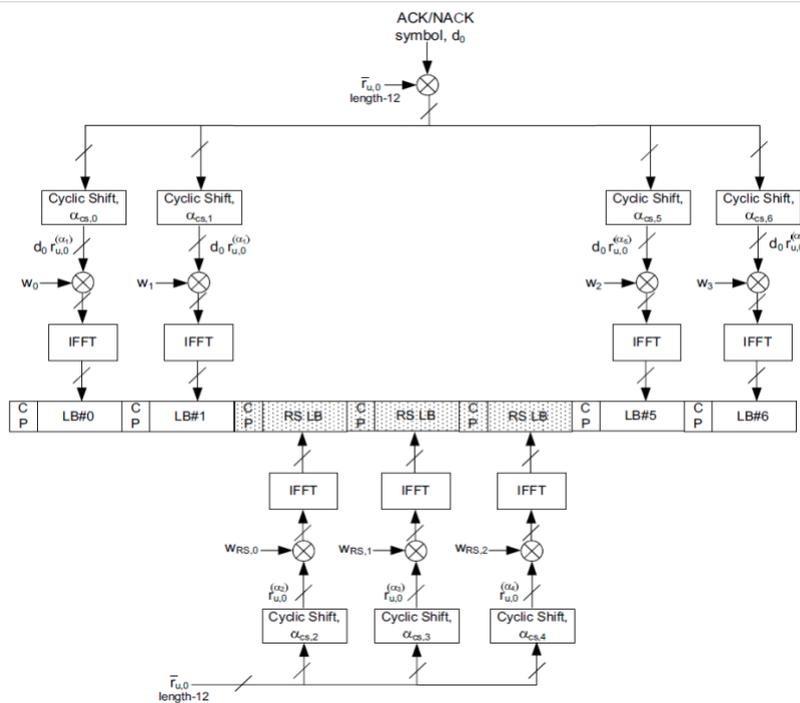


Figura 6.6. Estructura ACK/NACK, los UE son multiplexados mediante diferentes desviaciones cíclicas y dispersiones temporales [17].

Pueden multiplexarse por tanto, sobre el mismo PUCCH RB, un gran número de UEs (las RSs se multiplexan de igual forma). Para el multiplexador temporal, el número de



desviaciones permitido en un símbolo SC-FDMA para un RB de HARQ PUCCH, es configurable mediante un parámetro de señalización específico de capas superiores: $\Delta_{shift}^{PUCCH} \in \{1, 2, 3\}$, el cual indica 12, 6 o 4 desplazamientos cíclicos.

Para las dispersiones temporales, el número de códigos dispersivos permitidos está limitado por el número de símbolos RS ya que la capacidad de multiplexación de las RS es menor, al haber menos símbolos que transporten RS.

Se emplea un subset de códigos ortogonales de dispersión tamaño L ($s \leq L$), dependiendo del número de símbolos SC-FDMA para RS. Para un CP normal con cuatro símbolos de datos SC-FDMA y tres códigos ortogonales de dispersión (ya que en este caso hay 3 símbolos RS), se utilizan los índices 0, 1 y 2 de los códigos ortogonales de dispersión de longitud 4 para la dispersión de los bloques de datos en el dominio del tiempo.

Para los códigos ortogonales de longitud 4, las secuencias empleadas son aquellas en las que un subset genera la menor interferencia entre códigos, en condiciones de mucho efecto Doppler.

Tabla 6.1. Secuencias ortogonales de dispersión temporal.

Índice de secuencia ortogonal	Walsh-Hadamard Longitud 2	DFT Longitud 3	Walsh-Hadamard Longitud 4
0	[+1 +1]	[+1 +1 +1]	[+1 +1 +1 +1]
1	[+1 -1]	$[1 e^{j2\pi/3} e^{j4\pi/3}]$	[+1 -1 +1 -1]
2	N/A	$[1 e^{j4\pi/3} e^{j2\pi/3}]$	[+1 -1 -1 +1]
3	N/A	N/A	[+1 +1 -1 -1]

Tabla 6.2. Factores de dispersión para códigos de dispersión temporal para datos y RS en los formatos PUCCH 1/1a/1b con CPs normales o extendidos.

Factor de dispersión	CP Normal		CP Extendido	
	Datos N_{SF}^{PUCCH}	RS N_{RS}^{PUCCH}	Datos N_{SF}^{PUCCH}	RS N_{RS}^{PUCCH}
	4	3	4	2

Es posible configurar la transmisión de HARQ y SRS en la misma subtrama, si esto ocurre, el eNB puede configurar también la forma en la que estas transmisiones son atendidas por el UE. Una opción es la de que HARQ sea prioritario respecto a SRS, por lo que en la subtrama en cuestión sólo se transmite HARQ. La alternativa es que el eNB configure los UEs para utilizar una transmisión PUCCH más corta en aquellas subtramas en las que el último símbolo SC-FDMA del HARQ (el último símbolo del segundo slot de la subtrama) no es transmitido.

Para este PUCCH acortado, la longitud en el dominio del tiempo del código de dispersión ortogonal se reduce en uno, por lo que utiliza una DFT de longitud 3 en lugar de códigos Walsh-Hadamard.

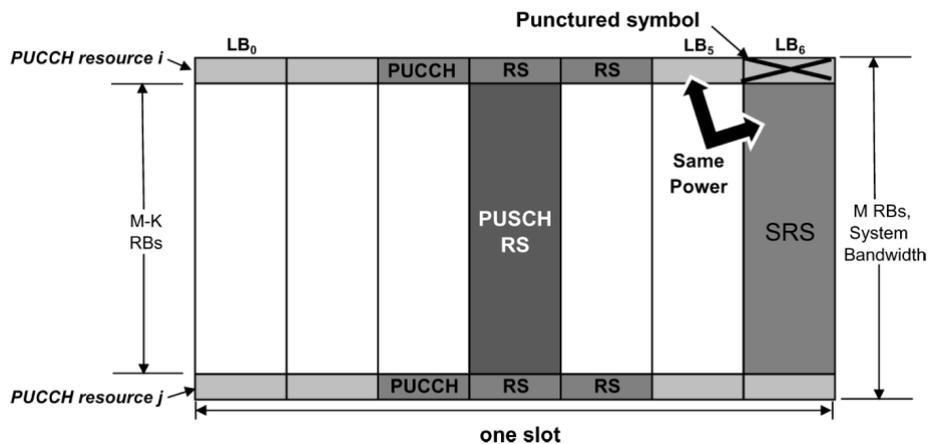


Figura 6.7. Un UE puede no transmitir SRS y PUCCH o PUSCH de manera simultánea [26].

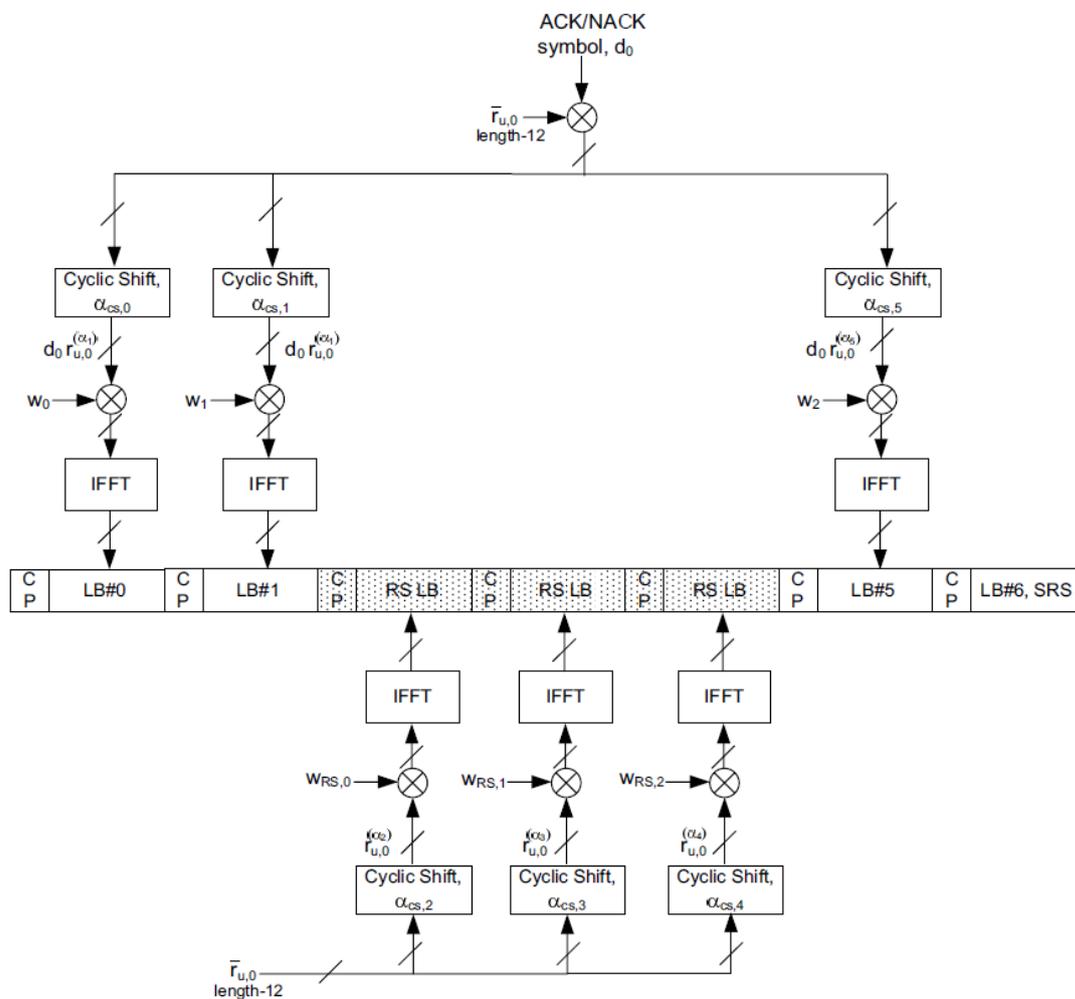


Figura 6.8. Estructura de PUCCH acortado para SRS y HARQ simultáneos [17].



El número de índices en los recursos HARQ $N_{PUCCH, RB}^{(1)}$, correspondientes a las combinaciones temporales cíclicas y ortogonales en código que puede soportar un PUCCH RB está dado por:

$$N_{PUCCH, RB}^{(1)} = c \cdot P, \quad c = \begin{cases} 3 & CP \text{ normal} \\ 2 & CP \text{ extendido} \end{cases} \quad (6.9)$$

Dónde $P = 12/\Delta_{shift}^{PUCCH}$ y $\Delta_{shift}^{PUCCH} \in \{1, 2, 3\}$ es el número de desplazamientos temporales cíclicos equiespaciados soportados.

Tal y como ocurría con el CQI, se utiliza un hopping en el desplazamiento temporal cíclico para proporcionar aleatorización en las interferencias entre celdas. En el caso de transmisiones de Downlink semi-persistentes en el PDSCH sin un “resource grant” correspondiente en el PDCCH, el índice de recurso $n_{PUCCH}^{(1)}$ de HARQ en PUCCH, que utiliza un UE, se configura mediante la señalización de capas superiores.

Este recurso HARQ se utiliza para la transmisión del ACK/NACK correspondiente a una transmisión HARQ inicial. Para configuraciones dinámicas de transmisiones de datos en Downlink en PDSCH, el índice de recurso PUCCH HARQ $n_{PUCCH}^{(1)}$ está determinado de manera implícita por el índice del primer Control Channel Element (CCE) en la asignación de control Downlink.

La región m PUCCH utilizada para la transmisión HARQ con formato 1/1a/1b en el caso de una región no mixta está dada por:

$$m = \left\lceil \frac{n_{PUCCH}^{(1)}}{N_{PUCCH, RB}^{(1)}} \right\rceil + N_{RB}^{(2)} \quad (6.10)$$

Dónde $N_{RB}^{(2)}$ es un parámetro de broadcast específico de celda y su valor indica el número de RBs disponibles para los formatos PUCCH 2/2a/2b. El índice de recurso $n^{(1)}(n_s)$, correspondiente a una combinación de desplazamientos cíclicos temporales n_{RS}^{PUCCH} y códigos ortogonales n_{oc} , en una región PUCCH m de slots pares está dado por:

$$n^{(1)}(n_s) = n_{PUCCH}^{(1)} \bmod N_{PUCCH, RB}^{(1)} \quad \text{para } n_s \bmod 2 = 0 \quad (6.11)$$

La ubicación de los índices en una RB PUCCH formato 1/1a/1b se muestra en la tabla 6.1, para $\Delta_{shift}^{PUCCH} \in \{1, 2, 3\}$ con 36, 18 y 12 índices de recursos respectivamente (CP normal). Para un CP extendido, con dos secuencias temporales ortogonales dispersivas, sólo las dos primeras columnas del código ortogonal índice de secuencia $n_{oc} = 1, 2$ se utilizan, lo que resulta en 24, 12 y 8 índices para $\Delta_{shift}^{PUCCH} \in \{1, 2, 3\}$.



Tabla 6.3. Asignación de índices de recursos RB en PUCCH formato 1/1a/1b.

(a) $\Delta_{shift}^{PUCCH} = 1,36$:

Índice de desplazamiento cíclico n_{RS}^{PUCCH}	Índice de secuencia ortogonal n_{oc}		
	$n_{oc} = 0$	$n_{oc} = 1$	$n_{oc} = 2$
0	0	12	24
1	1	13	25
2	2	14	26
3	3	15	27
4	4	16	28
5	5	17	29
6	6	18	30
7	7	19	31
8	8	20	32
9	9	21	33
10	10	22	34
11	11	23	35

(b) $\Delta_{shift}^{PUCCH} = 2,18$:

Índice de desplazamiento cíclico n_{RS}^{PUCCH}	Índice de secuencia ortogonal n_{oc}		
	$n_{oc} = 0$	$n_{oc} = 1$	$n_{oc} = 2$
0	0	6	12
1	-	-	-
2	1	7	13
3	-	-	-
4	2	8	14
5	-	-	-
6	3	9	15
7	-	-	-
8	4	10	16
9	-	-	-
10	5	11	17
11	-	-	-

(c) $\Delta_{shift}^{PUCCH} = 3, 12$:

Índice de desplazamiento cíclico n_{RS}^{PUCCH}	Índice de secuencia ortogonal n_{oc}		
	$n_{oc} = 0$	$n_{oc} = 1$	$n_{oc} = 2$
0	0	-	-
1	-	4	-
2	-	-	7
3	1	-	-
4	-	5	-
5	-	-	8
6	2	-	-
7	-	-	-
8	-	-	-
9	3	-	-
10	-	6	-
11	-	-	9

Los recursos PUCCH son indexados en el desplazamiento cíclico temporal, para después ser indexados por el código ortogonal temporal dispersivo. Los desplazamientos en tiempo utilizados en códigos ortogonales pueden también ser escalonados, lo que permite separar las estimaciones de canal antes de cancelar la dispersión.

Cuando el efecto Doppler rompe la ortogonalidad entre bloques dispersos, realizar un offsetting en las desviaciones temporales cíclicas en cada símbolo SC-FDMA puede restaurar la ortogonalidad con dispersiones moderadas, lo que permite el tracking de canales con alto Doppler.

Para aleatorizar la interferencia entre celdas el remapping del índice de recurso es utilizado en el segundo slot. El remapping del índice incluye tanto remapping del desplazamiento cíclico como del código ortogonal dispersivo (al igual que para CQI).

6.3.3. Scheduling Request

La estructura del SR en PUCCH formato 1 es la misma que para el HARQ PUCCH formato 1a/1b dónde un desplazamiento cíclico temporal de la secuencia base RS es modulado con una dispersión ortogonal en el dominio del tiempo [21]. El SR utiliza un simple mecanismo de On-Off, con el UE transmitiendo un SR un símbolo $d(0) = 1$ para solicitar un recurso PUSCH (transmisión SR positiva) o transmitiendo nada cuando no precisa solicitarlo (SR negativo).

Ya que se reutiliza la estructura HARQ para el SR existen diferentes índices de recursos PUCCH en la misma región PUCCH pueden asignarse a SR (formato 1) o HARQ (formato 1a/1b) desde diferentes UEs. Esto genera una multiplexación ortogonal del SQ y el HARQ en la misma región PUCCH. El índice de recurso PUCCH usado por un UE en una transmisión SR, $m_{PUCCH,SRI}^{(1)}$, está configurado por una señalización específica de UE de capas superiores.



En caso de que un UE necesite transmitir un ST positivo en la misma subtrama que una transmisión CQI programada, el CQI se cancela y solo el ST es transmitido, lo mismo ocurre con el SRS. Si un SR y un ACK/NACK coinciden en la misma subtrama el UE transmite el ACK/NACK en el recurso asignado SR PUCCH para un SR positivo y transmite ACK/NACK en su recurso asignado HARQ en caso de un SR negativo.

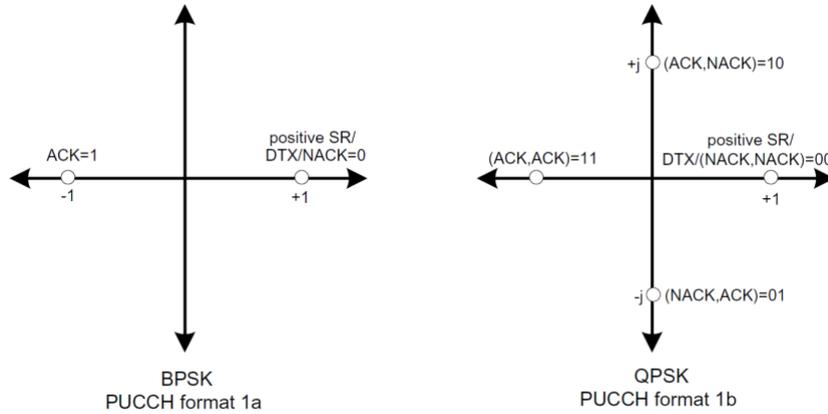


Figura 6.9. Mapeo de la constelación para ACK/NACK y SR para los formatos 1/1a/1b [23].

6.3.4. Multiplexación de la señalización de control y datos en PUSCH

Cuando la señalización de control se transmite en una subtrama en la que el UE ha asignado recursos para el PUSCH, la señalización de control se multiplexa junto los datos de UL-SCH antes de la DFTS, el PUCCH no es transmitido nunca en la misma subtrama que el PUSCH.

La multiplexación de CQI/PMI, HARQ y RI con los símbolos PUSCH en los RE del Uplink se muestra en la siguiente figura.

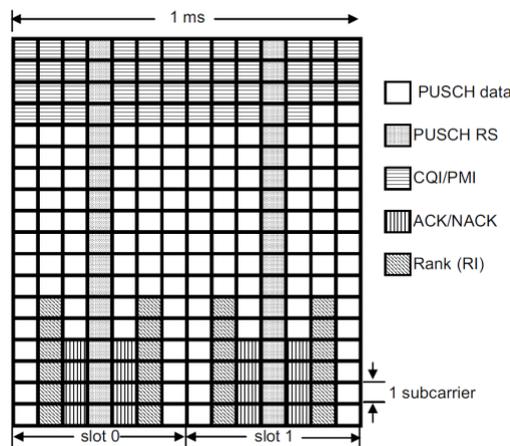


Figura 6.10 Multiplexación de la señalización de control con los datos UL-SCH [17].

El número de Res utilizado para cada uno está basado en el MCS asignado para PUSCH y un parámetro de offset: Δ_{offset}^{CQI} , $\Delta_{offset}^{HARQ-ACK}$ o Δ_{offset}^{RI} los cuales están configurados semi-



estáticamente por una señalización de capas superiores. Esto permite diferentes tasas de código a usar para la señalización de control. Los datos PUSCH y la información de control nunca se mapean sobre el mismo RE, la información de control se mapea de tal manera que se encuentra presente en ambos slots de la subtrama. Ya que el eNB tiene un conocimiento a priori de la transmisión de señalización en Uplink, puede demultiplexar los paquetes de datos y control.

Como se muestra en la figura 6.10, los recursos CQI/PMI son ubicados al comienzo de los recursos de datos UL-SCH y mapeados de manera secuencial sobre todos los símbolos SC-FDMA de una subportadora antes de continuar a la siguiente subportadora. Se aplica un rate-matching a los datos UL-SCH alrededor de los datos CQI/PMI. El mismo orden de modulación que en UL-SCH para PUSCH se utiliza para CQI/PMI, para pequeños tamaños de CQI y/o PMI (menos de 11 bits) se emplea un código bloque (32,k) similar al de PUCCH sin aplicar CRC, para tamaños mayores de 11 bits se añade un CRC de 8 bits y se realiza una codificación de canal y se realiza un rate matching mediante un código convolucional tail-biting.

Los recursos HARQ se mapean sobre los símbolos SC-FDMA realizando un puncturing de los datos UL-SCH del PUSCH, se utilizan las posiciones al lado de los RS. La cantidad máxima de recursos para HARQ son 4 símbolos SC-FDMA.

Los símbolos RI codificados se colocan al lado de los símbolos HARQ (estén o no en la subtrama concreta), la modulación de 1 o 2 bits ACK/NACK o RI es tal que la distancia Euclídea entre los símbolos transportando ACK/NACK y RI es máxima. Se utilizan los puntos más alejados de la constelación de mayor orden en PUSCH (16 o 64QAM), lo que se traduce en un incremento de la potencia transmitida para ACK/NACK/RI relativa a la media de potencia de datos PUSCH.

La codificación del RI y el CQI/PMI van por separado, realizando un rate-matching con los datos de UL-SCH alrededor de los REs de RI. En el caso de 1 bit ACK/NACK o RI, se emplea un código de repetición, para el caso de 2 bits ACK/NACK/RI se emplea un código (3, 2) con repetición circular de los datos codificados opcional (Tabla 6.4).

Tabla 6.4. Código para 2 bits ACK/NACK/RI.

Secuencia 2 bits	Codeword 3 bits
00	000
01	011
10	101
11	110

En LTE, la señalización de control (utilizando modulación QPSK) puede ser configurada para ser transmitida en el PUSCH sin datos UL-SCH. La señalización de control (CQI/PMI, RI y HARQ) se multiplexa antes de la DFTS para preservar la característica de baja PAPR de una single-carrier.

La multiplexación de HARQ y RI con los símbolos CQI/PMI QPSKs sobre los REs del Uplink es similar a la mostrada en la figura 6.8. Se mapea HARQ en los símbolos SC-FDMA



al lado de RS, mediante un puncturing de los datos CQI y los símbolos RI independientemente de si ACK/NACK está o no en la subtrama.

6.3.5. Técnicas multi-antena

La primera versión de LTE no soporta la transmisión simultánea de múltiples antenas por parte de un UE, ya que se presupone que éste sólo tiene un único amplificador de potencia, sin embargo, LTE soporta una diversidad de transmisión de antena closed-loop en el Uplink para UEs con múltiples antenas transmisoras. LTE está además diseñado para soportar SDMA en Uplink o Virtual Multi-User MIMO (MU-MIMO).

6.3.6. Diversidad de antenas closed-loop

La selección de antenas closed-loop en Uplink (para hasta dos antenas transmisoras) está soportada como una capacidad del UE en LTE. Si un UE señala que soporta selección de antenas en Uplink el eNB puede tomar en cuenta esta capacidad cuando configura el UE.

Si el eNB activa la capacidad de un UE de usarla, las transmisiones SRS se alternan entre antenas transmisoras en las sucesivas transmisiones de subtramas independientemente de si el hopping en frecuencia está activado o no, excepto cuando el UE está configurado para transmisiones individuales de SRS.

Tabla 6.5. Selección de máscara CRC para transmisión en UE.

	Máscara de antena
Antena transmisora 0 en UE	<0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0>
Antena transmisora 1 en UE	<0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1>

Cuando se activa la selección de antena, el eNB indica que antena debería ser utilizada para el PUSCH mediante la codificación del “scheduling grant” (DCI formato 0) al ser scrambleados los 16 bits de paridad CRC con la máscara de antena seleccionada. Esta máscara se aplica junto con la UE-ID-masking la cual indica a que UE le corresponde el “scheduling grant”.

La UE-ID se puede detectar directamente con los 15 bits menos significativos de la máscara decodificada sin necesidad de utilizar la máscara de selección de antena (bit 16). El comportamiento del UE para retransmisiones HARQ adaptativas y no adaptativas cuando está configurado para selección de antena es el siguiente:

- HARQ adaptativo, el indicador de antena (con el enmascaramiento del CRC) se envía siempre en el grant Uplink para indicar la antena a utilizar. Por ejemplo, para un UE con mucho Doppler y HARQ adaptativo, el eNB puede indicar al UE que alterne entre antenas transmisoras o seleccionar una antena principal. En implementaciones



típicas de UE una descompensación de ganancia entre antenas transmisoras principal y secundaria de 3 a 6 dB es algo común.

- HARQ no adaptativo, no se obliga a un comportamiento específico del UE, por lo que el UE podría usar bajo condiciones suaves de Doppler la misma antena señalada en el grant Uplink mientras que para mucho Doppler podría realizar hopping entre antenas o simplemente utilizar una antena principal.

6.3.7. MU-MIMO o SDMA

MU-MIMO en Uplink consiste en múltiples UEs transmitiendo en el mismo set de RBs, cada uno empleando una única antena transmisora. Desde un punto de vista de un UE individual, este modo de operación es difícilmente apreciable, siendo un problema del eNB el manejar y configurar la recepción Uplink.

Para soportar MU-MIMO en Uplink, LTE proporciona DM-RSs ortogonales utilizando diferentes desviaciones temporales cíclicas para permitir que el eNB interprete las estimaciones de canal independientes de cada UE.

Una celda puede asignar hasta ocho desplazamientos temporales cíclicos mediante los 3 bits del scheduling grant en el PUSCH destinados para ello. Ya que ocho es el máximo, sólo se puede soportar SDMA de hasta ocho UEs en una celda. SDMA entre celdas está contemplado en LTE mediante la asignación de los mismos grupos secuenciales base y/o patrones de salto RS.

6.4. Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)

El PUSCH transporta los datos del canal Shared Channel (UL-SCH) de la Capa de Transporte Uplink. LTE en Uplink puede utilizar configuración selectiva en frecuencia o configuración no selectiva en frecuencia, la primera está basada en el conocimiento del canal por parte del eNB, el cual configura al UE para transmitir en RBs específicos dónde la respuesta al canal en frecuencia es buena. El segundo pretende beneficiarse de la diversidad en frecuencia para la transmisión de cada Transport Block [17] [26].

En la configuración selectiva en frecuencia, se emplean las mismas ubicaciones localizadas (RBs contiguos en frecuencia) de los recursos para ambos slots de la subtrama. La ubicación en tiempo y frecuencia del RB, así como su Modulation and Coding Scheme (MCS), se escogen en función de la localización y la calidad en la respuesta del canal.

Para mantener una configuración selectiva en frecuencia se precisa de información oportuna de la calidad del canal en el eNB. Un método para obtener esta información es el de emplear las SRS previamente descritas.

El rendimiento con SRS depende del ancho de banda de sounding y de la calidad del canal estimado, siendo este último una función de la densidad espectral de potencia en transmisión empleada para SRS. Con un amplio ancho de banda de sounding, la calidad del enlace puede ser evaluada en muchos RBs.



Hay casos en los que la información de la calidad del canal no está disponible, en estos casos, es preferible explotar la diversidad en frecuencia. En LTE se utilizan saltos en frecuencia en una transmisión localizada para proporcionar diversidad en frecuencia. Se emplean dos modos de salto, que se pueden apreciar en la figura 2.6.1.1, uno para saltos sólo entre subtramas y otro para saltos dentro de las subtramas y entre subtramas.

Se emplea señalización broadcast específica de celda para configurar el modo de salto. En caso de emplear el Segundo, el salto en frecuencia sucede en el extremo del slot, en el medio de la subtrama, lo que proporciona diversidad espectral en un codeword. Por lo otro lado, el primero modo proporciona diversidad frecuencial entre retransmisiones HARQ de un TB.

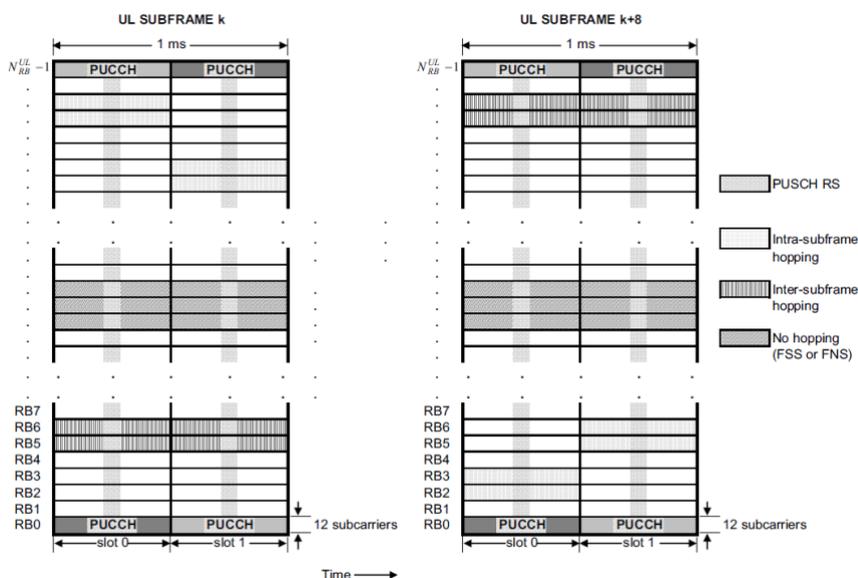


Figura 6.11 Modos de salto en PUSCH [26].

Se definen dos métodos para la ubicación de los saltos, uno con un patrón pseudoaleatorio y otro con un offset específico señalado en el “resource grant” del UL en PDCCH (valor de capas superiores que se transporta en el DCI formato 0).

Para anchos de banda de sistema de menos de 50 RBs, el valor de tamaño del offset es aproximadamente la mitad de los RBs disponibles para transmisiones PUSCH $\left(\frac{N_{RB}^{PUSCH}}{2}\right)$, mientras que para anchos de banda de más de 50 RBs los offset posibles son $\left(\frac{N_{RB}^{PUSCH}}{2}\right)$ y $\left(\frac{N_{RB}^{PUSCH}}{4}\right)$.

La señalización del salto en frecuencia mediante el “resource grant” puede emplearse para configuraciones semi-selectivas, en las que el recurso en frecuencia se asigna selectivamente para el primer slot de una subtrama, consiguiendo diversidad espectral mediante el salto a una frecuencia diferente en el segundo slot.



La estructura para su transmisión se muestra en la figura 2.6.1, los bits de información se codifican primero con un turbo código de tasa madre $r = 1/3$, el cual se adapta para proporcionar una correcta tasa de código final mediante un RM.

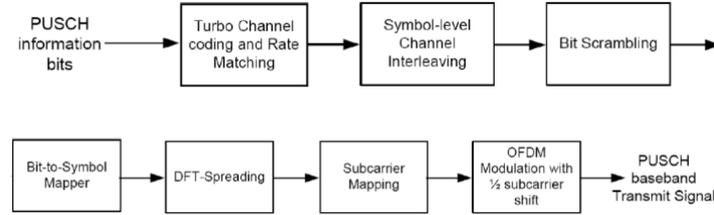


Figura 6.12 Procesamiento del canal PUSCH [17].

Dicho código se introduce en un interleaver a nivel de símbolo el cual mapea símbolos adyacentes de datos en símbolos SC-FDMA adyacentes en el dominio del tiempo. Tras esto se realiza un scrambling con un código Gold previo a la modulación.

La señal se desplaza en frecuencia la mitad de una subportadora antes de la transmisión para evitar la distorsión que provoca la subportadora de DC concentrada en un RB. Las modulaciones soportadas son QPSK, 16QAM y 64QAM. La señal SC-FDMA en banda base para cada símbolo es:

$$S_l(t) = \sum_{k=-\left\lfloor \frac{N_{RB}^{UL} N_{sc}^{RB}}{2} \right\rfloor}^{\left\lfloor \frac{N_{RB}^{UL} N_{sc}^{RB}}{2} \right\rfloor - 1} a_{k^{(-)},l} \exp \left[j2\pi \left(k + \frac{1}{2} \right) \Delta f (t - N_{cp,l} T_s) \right] \quad (6.12)$$

Para $0 \leq t \leq (N_{CP,l} + N) T_s$, donde $N_{CP,l}$ es el número de muestras del CP en el símbolo SC-FDMA l , $N=2048$ es el tamaño de la IFFT, $\Delta f = 15\text{KHz}$ es el espacio entre subportadoras, $T_s = 1/(N \cdot \Delta f)$ es el intervalo de muestreo, N_{RB}^{UL} es el ancho de banda del sistema en Uplink en RBs, $N_{sc}^{RB} = 12$ es el número de subportadoras por RB, $k^{(-)} = k + \left\lfloor \frac{N_{RB}^{UL} N_{sc}^{RB}}{2} \right\rfloor$ y $a_{k,l}$ es el contenido de la subportadora k en el símbolo l .

Para símbolos PUSCH $a_{k,l}$ se obtiene mediante la DFTS de los símbolos QAM $[d_{0,l}, d_{1,l}, \dots, d_{M_{sc}^{PUSCH}-1,l}]$, a transmitir en el símbolo SC-FDMA l .

$$a_{k,l} = \frac{1}{\sqrt{M_{sc}^{PUSCH}}} \sum_{i=0}^{M_{sc}^{PUSCH}} d_{i,l} \exp \left(-\frac{j2\pi i k}{M_{sc}^{PUSCH}} \right) \quad (6.13)$$

Para $k = 0, 1, 2, \dots, M_{sc}^{PUSCH} - 1$, donde $M_{sc}^{PUSCH} = M_{sc}^{PUSCH} \cdot M_{sc}^{PUSCH}$ y M_{RB}^{PUSCH} es el ancho de banda asignado para PUSCH en los RBs.



Se emplea una configuración HARQ, la cual es síncrona en el Uplink, utilizando N-canales de stop and wait. Esto quiere decir que las retransmisiones ocurren en subtramas periódicas específicas (canales HARQ).

6.5. Physical Random Access Channel (PRACH)

En LTE el PRACH no puede transportar ningún dato de usuario, únicamente se utiliza para lograr sincronización temporal en el Uplink para un UE que o aún no ha sido sincronizado con el eNB o bien ha perdido dicha sincronización [48][49]. Por tanto, los posibles escenarios para el uso del PRACH son:

- UE en estado **RRC_CONNECTED**.
 - No sincronizado en Uplink.
 - Necesita enviar nueva información de Uplink.
 - Necesita recibir nueva información de Downlink.
 - Sincronizado, cambiando de celda.
- UE transición de RRC_IDLE a RRC_CONNECTED.
 - Acceso Inicial a celda.
 - Tracking de actualizaciones en el área.
- Recuperando un fallo en el radioenlace.

Un caso excepcional adicional puede darse con el Scheduling Request (SR), un UE puede utilizar PRACH para enviarlo en el caso de que no tenga ningún otro recurso Uplink asignado para enviar el SR.

Un Proceso de Random Access (RAP) exitoso debería permitir sucesivas transmisiones del UE al eNB entre las otras transmisiones sincronizadas de otros UEs. Esto fija la estimación del timing requerido, el cual debe poder ser alcanzado con el PRACH, y por lo tanto el ancho de banda requerido en la transmisión del PRACH.

En LTE el RAP, tiene dos formas de llevarse a cabo, permitiendo acceso: basado en contención (riesgo de colisión) o sin contención.

El UE inicia un RAP basado en contención para todos los casos listados en el apartado anterior. En este caso el UE escoge una firma como preámbulo de manera aleatoria, lo que tiene un riesgo de colisión en el eNB ya que otro UE podría haber escogido el mismo.

Para los casos en los que el UE necesita nueva información Downlink o está cambiando de celda, el eNB puede enviarle una firma específica al usuario permitiendo un RAP sin contención, lo que permite un acceso más rápido, algo que resulta clave en el caso de migración a otra celda LTE.

En cada celda LTE se encuentra fijado un número de 64 firmas como preámbulos. La operación con el RAP depende de la división de dicho número entre los dos tipos existentes. Los cuales se explican de manera más detallada a continuación.

6.5.1. Proceso Random Access basado en contención

Este proceso consiste en cuatro pasos o etapas:



1. Transmisión del preámbulo.
2. Respuesta Random Access.
3. Mensaje de capa 2 y capa 3 (L2/L3).
4. Mensaje de resolución de contención.

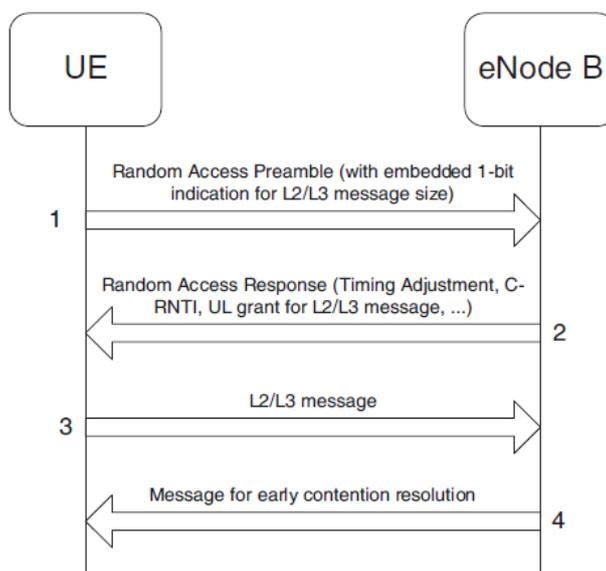


Figura 6.13 Proceso Random Access basado en contención [17].

6.5.1.1. Paso 1, transmisión del preámbulo

El UE selecciona una de las $64 - N_{cf}$ firmas disponibles para RAP basados en contención, donde N_{cf} es el número de firmas reservadas por el eNB para las libres de contención. El set disponible está además dividido en dos subgrupos, de esta manera la elección de la firma indica (1 bit) información relacionada con la cantidad de recursos necesarios para transmitir el mensaje en el paso 3.

La información de sistema broadcast (SIBs) indica que firmas se encuentran en cada uno de los subgrupos, así como el significado de cada uno. El eNB puede controlar el número de firmas en cada subgrupo en función de su disponibilidad.

La potencia de transmisión inicial del preámbulo está basada en una estimación de bucle abierto para compensar por completo las pérdidas por propagación. Esto ayuda al eNB con la detección de muchas transmisiones de preámbulo simultaneas en el mismo recurso (frecuencia y tiempo) PRACH.

El UE calcula las pérdidas por propagación mediante la potencia recibida en las señales de referencia RS en Downlink. El eNB puede configurar un offset de potencia adicional, por ejemplo, para cumplir cierta condición SNR.



6.5.1.2. Paso 2, respuesta Random Access (RAP)

El eNB envía la RAR mediante el PDSCH con un ID, el RA-RNTI, el cual señala el slot temporal y frecuencial en el que se detectó el preámbulo. El RAR contiene instrucciones de sincronización para las posteriores transmisiones Uplink desde el UE, así como un *resource grant* para la transmisión del mensaje L2/L3 y la asignación de un C-RNTI temporal (la temporalidad depende del paso 4). El mensaje RAR puede contener además un indicador de *backoff* en el que se indica al UE que se mantenga en espera para reintentar el Random Access.

El UE espera recibir el RAR dentro de una ventana temporal (2 ms a 4 ms), cuyo inicio y final vienen dados en la información broadcast de sistema enviada por el eNB.



Figura 6.14 Ventana temporal del RAR [17].

El mensaje G se envía por el PDCCH previo al RAR e indica la ubicación del recurso dónde irá el RAR. Si el UE no recibe el RAR en el tiempo estipulado retransmite el preámbulo, teniendo únicamente 3 ms de margen para la retransmisión al eNB.

6.5.1.3. Paso 3, mensaje L2/L3

Este mensaje es la primera transmisión mediante el canal físico PUSCH y utiliza por tanto HARQ. Transmite el verdadero mensaje para el proceso Random Access, como la petición de conexión RRC, tracking de actualizaciones en el área o peticiones de configuración. Incluye el C-RNTI temporal del paso 2 o la identidad (única, 48 bits) del UE.

Si el UE recibe el RAR de forma correcta, el tiempo mínimo de procesamiento previo al envío del mensaje L2/L3 es de 5 ms menos el tiempo de propagación. Esto se muestra en la figura 3.2.1.3 para el caso de una celda de 100 km (máximo tamaño).

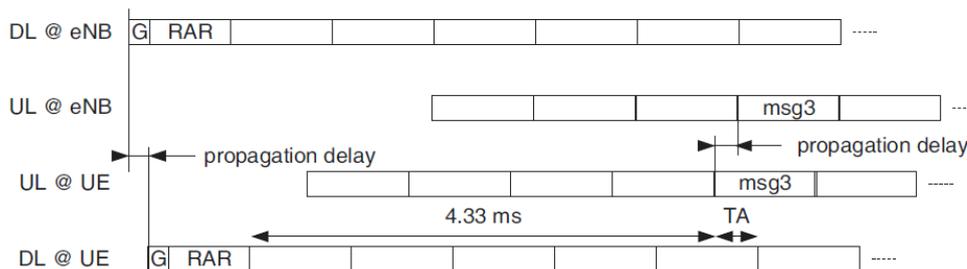


Figura 6.15 Timing de la transmisión del mensaje L2/L3 [17].



6.5.1.4. Paso 4, mensaje de resolución de contención

El mensaje de resolución de contención está dirigido al C-RNTI, soporta HARQ y en el caso de una colisión seguida de por una decodificación del mensaje L2/L3, el feedback HARQ se transmite sólo por el UE, el cual detecta su propio C-RNTI (o identificador de 48 bits), el resto de UEs entienden que ha habido colisión y no retransmiten feedback HARQ, pudiendo salir rápidamente del RAP e intentar uno nuevo. Existen por tanto tres posibilidades:

- El UE decodifica correctamente el mensaje y detecta su propia ID, envía un ACK.
- El UE decodifica correctamente el mensaje y detecta otra ID, no envía nada.
- El UE no puede decodificar el mensaje o pierde el Downlink grant, no envía nada.

6.5.2. Proceso Random Access libre de contención

La latencia impredecible en el RAP puede ser solventada en algunos casos críticos como el de migración de celda, mediante la asignación de una firma de preámbulo dedicada al UE. En este caso el procedimiento se simplifica tal y como muestra la figura 3.2.1.4.

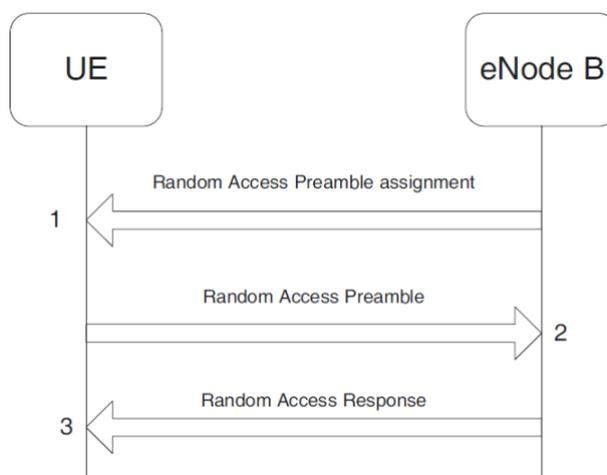


Figura 6.16 RAP libre de contención [17].

6.5.3. Diseño del PRACH

El preámbulo del Random Access se mapea a nivel de capa física en el PRACH, el diseño del preámbulo es crucial para el éxito del RAP, por lo que la siguiente sección se centra en los detalles del diseño PRACH.

El PRACH se multiplexa en tiempo y frecuencia con el PUSCH y PUCCH tal y como muestra la figura 3.3.1. Los recursos del PRACH se asignan de manera semi-estática en la región del PUSCH y se repiten de manera periódica. La posibilidad de configurar transmisiones PUSCH en slots del PRACH se deja en manos del eNB.

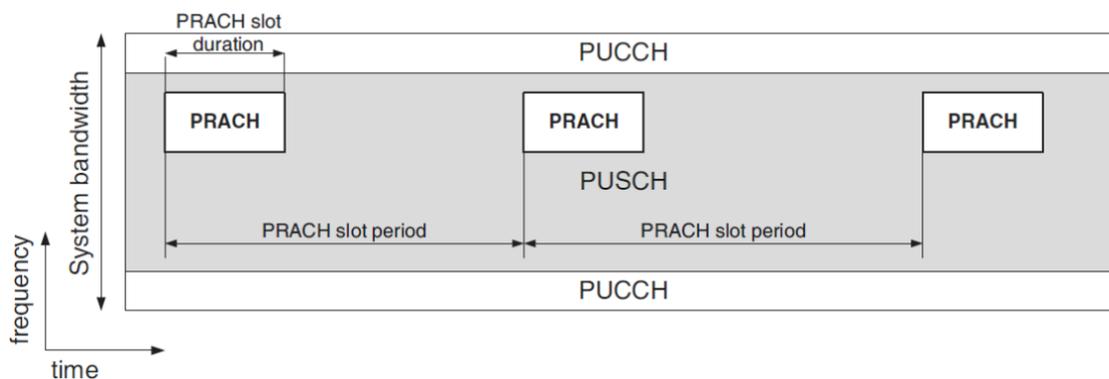


Figura 6.17 Multiplexación del PRACH con PUSCH y PUCCH [43].

El preámbulo consiste en una secuencia compleja contenida en símbolos OFDM con sus CP tal y como se muestra en la figura 6.18, el final de la secuencia se añade al inicio del preámbulo lo que permite una correlación periódica en el receptor.

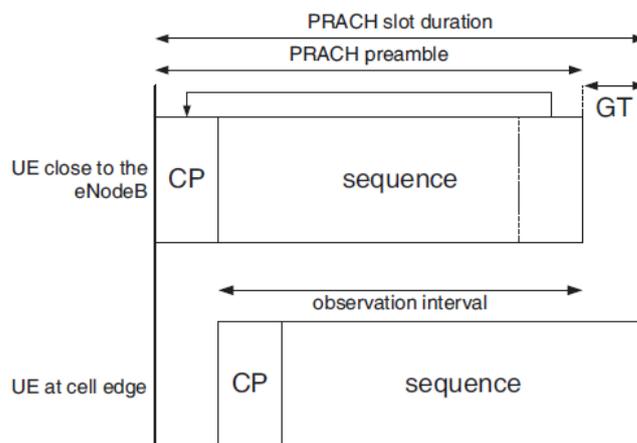


Figura 6.18 Preámbulo PRACH recibido en el receptor [43].

El UE alinea el inicio del preámbulo con el inicio de la subtrama Uplink correspondiente asumiendo un tiempo de avance cero y que la longitud del preámbulo es menor al de un slot PRACH proporcionando así espacio al periodo de guardia para poder absorber el delay. La figura 3.3.2.1 muestra dos preámbulos en el eNB recibidos con diferentes timings, dependiendo del delay en la propagación.

Se definen cuatro formatos de preámbulo para FDD, cada formato está referido a las duraciones de la secuencia y su CP, se muestran en la Tabla 6.6.



Tabla 6.6.Formatos de preámbulo para FDD.

Formato de preámbulo	$T_{CP}(\mu s)$	$T_{SEQ}(\mu s)$	Uso
0	103.13	800	Celdas pequeñas/medianas (hasta 14km)
1	684.38	800	Celdas grandes sin problema en enlace (hasta 77km)
2	203.13	1600	Celdas medianas con baja tasa de datos (hasta 14km)
3	684.38	1600	Celdas muy grandes (hasta 100 km)

A continuación, se discuten las elecciones de duración de la secuencia y CP.

La duración de la secuencia T_{SEQ} , está condicionada por los siguientes factores:

- Compromiso entre el overhead y la duración de la secuencia.
- Compatibilidad con el máximo delay.
- Compatibilidad entre el espacio entre subportadoras de PRACH y PUSCH.
- Rendimiento de la cobertura.

El límite inferior para T_{SEQ} debe permitir una estimación del tiempo de vuelo para un UE situado en el límite de la celda más grande (100 km de radio), incluyendo la máxima dispersión del retardo que en celdas tan grandes se considera de $16.67\mu s$, por lo tanto:

$$T_{SEQ} \geq \frac{200 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} + 16.67 \cdot 10^{-6} = 683.33 \mu s \quad (6.14)$$

Como norma general, a mayor longitud de la frecuencia mayor cobertura, sin embargo, una Buena cobertura necesita de un CP y un GT más largo para poder soportar el delay del tiempo de vuelo. La longitud del prefijo cíclico y el tiempo de guarda necesarias para un PRACH formato 0, por ejemplo, pueden estimarse del tiempo de vuelo para una secuencia preámbulo que quepa en una subtrama de 1ms.

Bajo un escenario de ruido típico de una celda suburbana o rural, el rendimiento de la cobertura puede estimarse con el modelo empírico de Okumura-Hata:

$$P_{RA}(r) = P_{max} + G_a - L(r) - LF - P_L(dB) \quad (6.15)$$

La duración de la secuencia preámbulo T_{SEQ} se deriva de la energía requerida para cumplir una determinada relación señal-ruido:

$$T_{SEQ} = \frac{N_0 N_f E_p}{P_{RA}(r) N_0} \quad (6.16)$$

Dónde N_0 es la densidad de potencia de ruido térmico en mW/Hz y N_f es la figura de ruido del receptor. Asumiendo la necesidad de que $\frac{E_p}{N_0} = 18 dB$ para cumplir una probabilidad de falsa detección de 10^{-2} y una falsa alarma de 10^{-3} se obtiene una longitud de CP y GT de $93.3 \mu s$ por lo que el límite superior para T_{SEQ} :



$$T_{SEQ} \leq 1000 - 2.93.33 = 813 \mu s \quad (6.17)$$

Por lo que, para cumplir las dos ecuaciones anteriores, la mayor longitud de la secuencia preámbulo es de 800 μs , que es la que se emplea para los formatos 0 y 1, el espacio entre subportadoras en PRACH es de 1.25 KHz. Los preámbulos con formato 2 y 3 tienen 1600 μs de duración, el cual se implementa repitiendo los 800 μs base.

El preámbulo PRACH puede generarse a la frecuencia de muestreo del sistema tal y como muestra la Figura 6.19:

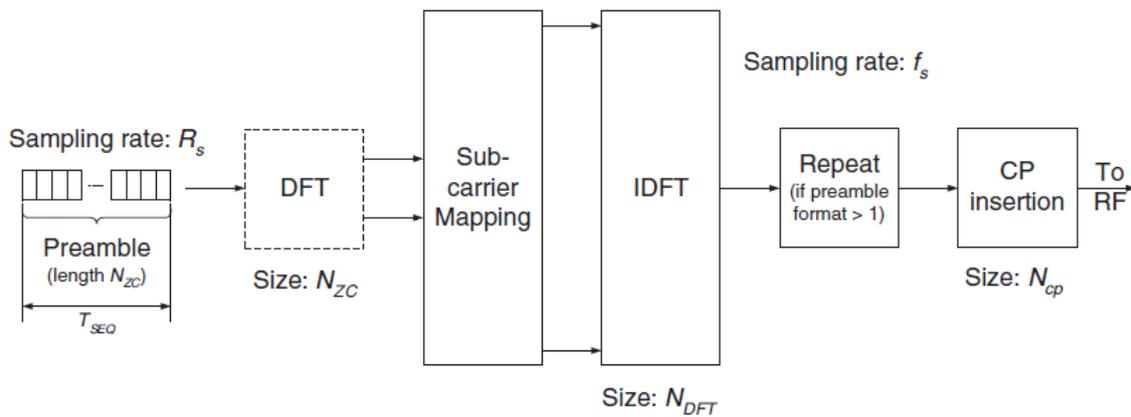


Figura 6.19 Estructura de un transmisor de preámbulo PRACH [49].

El método mostrado no requiere de filtrado en banda base, pero supone un tamaño elevado de IDFT. Otra opción para generar el preámbulo consiste en utilizar un IDFT menor, desplazando el preámbulo a la frecuencia requerida mediante un sobre muestreo y filtrado mostrado en la figura 6.20.

Suponiendo que la longitud de preámbulo de 839, la IFFT más pequeña disponible sería de 1024, lo que supone una frecuencia de muestreo de 1.28 Msps. Tanto el CP como las duraciones de secuencia han sido diseñadas para proporcionar un número entero de muestras a esta frecuencia. El CP puede insertarse antes del sobre muestreo y el desplazamiento frecuencial.

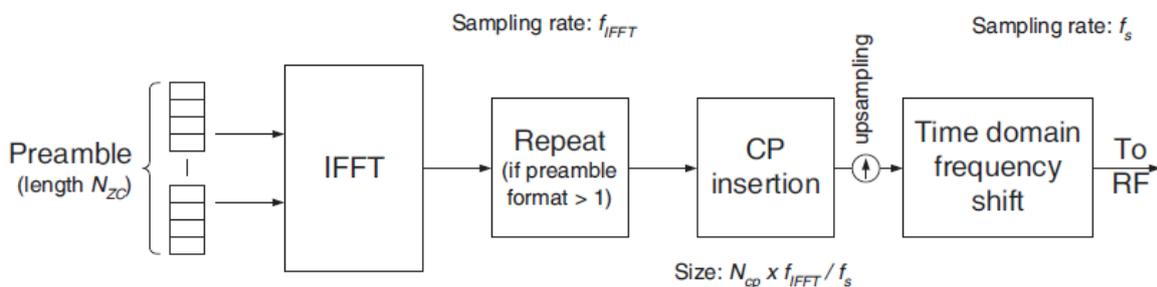


Figura 6.20 Preámbulo PRACH híbrido tiempo/frecuencia[49].



7

Capas en LTE

Dado que este documento se centra en la capa física y MAC de LTE no se ha entrado en detalle de las capas superiores, sin embargo, a medida que avanza la comunicación entre el equipo usuario y la estación base se hace necesaria una idea general de las capas o estratos en LTE. Por tanto, el objetivo de este capítulo es el de resumir las capas que conforman LTE.

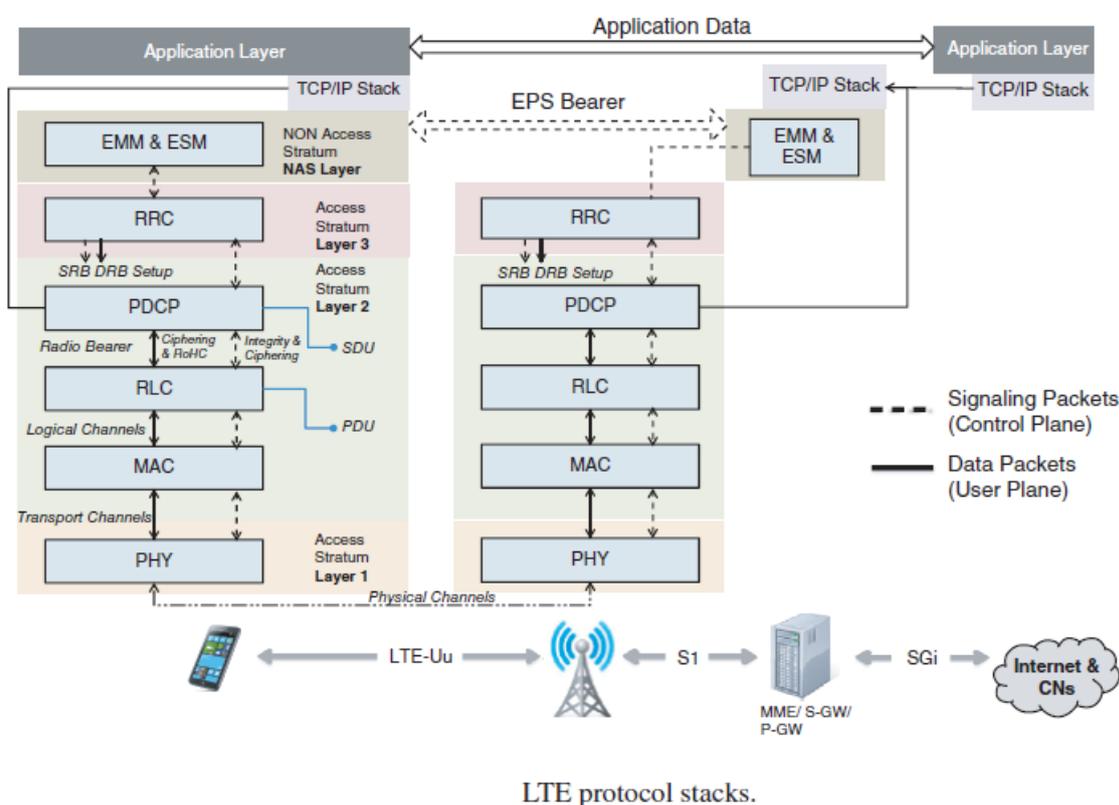


Figura 7.1 Interacción entre capas LTE [50].

7.1. Capa PHY

La capa física transporta a través del aire toda la información que proviene de los canales de transporte de la capa MAC [51]. Se ocupa de la adaptación del enlace (AMC - Adaptive Modulation and Coding), del control de potencia, búsqueda de células (para sincronización inicial y handovers) y otras mediciones para la capa RRC. Se denomina PRB (Physical Resource Block), al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a



un UE. PRB es un bloque de 12 subportadoras en el que se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico. La duración de un PRB es de 0.5 ms, es decir la duración de un slot o ranura de tiempo. Por otro lado, los datos a transmitir llegan a la capa física de la interfaz radio en forma de bloques de transporte (transport block - TB) de un tamaño variable en intervalos de tiempo TTI (Time Transmission Interval) de duración 1 ms (dos time slot). Un TB es un grupo de PRBs con una modulación/codificación común que son enviados a un usuario en un TTI. El tamaño del TB se asigna de acuerdo al CQI reportado por el UE (en el caso del DL) y a las medidas de canal que hace el eNB (en el UL). Cada subtrama de radio (que es la entidad que contiene el TB) es de 1 ms (duración de un TTI) y cada trama es de 10 ms (En LTE, por cada TTI de 1 ms, se puede transmitir un TB o dos en el caso de MIMO).

7.2. Capa MAC

Es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. La sub-capa MAC [51] proporciona las siguientes funcionalidades:

- Mecanismos de corrección de errores mediante procedimientos de retransmisión (Hybrid ARQ o HARQ).
- Gestión de prioridades utilizando técnicas de gestión dinámica de recursos (Dynamic Scheduling).
- Selección del formato de transmisión (tipo de modulación, tamaño del bloque de transporte, etc.) a utilizar por parte de la capa física.
- Multiplexado/demultiplexado de paquetes MAC (MAC_SDUs) en los denominados bloques de transporte (Transport Blocks o TB) para ser entregados/recibidos a/de los canales físicos.
- Informar sobre la gestión de los recursos radio. De forma general, el sistema LTE gestiona los recursos de dos formas: gestión dinámica y gestión semi-estática o persistente. En el caso de gestión dinámica de recursos, utiliza el enlace descendente (desde eNB hacia UE) para enviar mensajes de asignación de recursos y el enlace ascendente (desde UE hacia eNB) para confirmar dicha asignación, subtrama a subtrama. En el caso de asignación semi-estática el procedimiento es similar, sólo que los recursos asignados en el enlace ascendente lo son por un periodo de tiempo mayor que una subtrama.

7.3. Capa RLC

La subcapa RLC [52] es la responsable de una transmisión fiable de la información a través de la interfaz aire. La sub-capa RLC proporciona las siguientes funcionalidades:

- Implementa procedimientos de segmentación/concatenación de los paquetes IP recibidos de capas superiores (también denominados RLC_SDU) para adaptar su tamaño a las capacidades de transmisión de la interfaz aire. A los paquetes creados se les denomina RLC_PDUs.



- Implementa mecanismos de retransmisión de los RLC_PDU recibidos erróneamente, así como evitar duplicidades y gestiona que los paquetes RLC_SDU recibidos se entreguen ordenados a las capas superiores.
- Entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de handover)
- Existen tres modos de operación de la sub-capa RLC:
 - Modo Transparente (i.e., Transparent Mode o TM). Este es el modo de operación más simple ya que la sub-capa RLC entrega directamente a la sub-capa MAC los RLC_SDU recibidos de las capas superiores. No se introduce ninguna cabecera a nivel de capa RLC, ni existen mecanismos de segmentación/concatenación, ni de retransmisión.
 - Modo de No-reconocimiento (i.e., Unacknowledged Mode o UM). Este modo de operación detecta si los paquetes RLC_SDU recibidos contienen errores, pero no implementa mecanismos de retransmisión. También realiza funciones de segmentación y reensamblado así como gestiona la reordenación, si es necesario, de los RLC_SDU recibidos. Para ello utiliza un campo de la cabecera RLC denominado número de secuencia (i.e., Sequence Number).
 - Modo de Reconocimiento (i.e., Acknowledged Mode o AM). Es el modo de operación más robusto. Además de las funciones de segmentación/reensamblado y de ordenación de los RLC_SDU también proporciona mecanismos de retransmisión tipo ARQ para eliminar posibles errores introducidos por el canal radio.

7.4. Capa PDCP

Los paquetes IP del tráfico del plano de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por la capa PDCP [52]. El protocolo PDCP tiene como funcionalidades más importantes:

- Compresión/descompresión de las cabeceras de los paquetes IP que llegan al eNB. El protocolo utilizado para ello es el denominado Robust Header Compression (ROHC) (de 40 bytes a 1-3 bytes). La cabecera añadida por la capa PDCP contiene básicamente un número de secuencia que identifica al paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes IP en el extremo receptor así como detectar posibles duplicados de los paquetes IP (ocasionados por ejemplo en un proceso de handover).
- Cifrado de los datos
- Funcionalidades adicionales de capa 2 tales como reordenación y/o detección de duplicidades de paquetes RLC cuando se implementan mecanismos de movilidad entre eNBs.

7.5. Capa RRC

En LTE se han definido dos posibles estados para los equipos de usuario (UE). El estado IDLE y el estado CONNECTED. En el estado IDLE, el UE no transmite ni recibe datos,



solamente monitoriza los mensajes de aviso y broadcast para mantener la conectividad [52]. En este estado se incrementa el tiempo de vida de la batería. El UE pasa al estado conectado cuando la señalización RRC es establecida. En este estado el UE y la red están constantemente comunicándose.

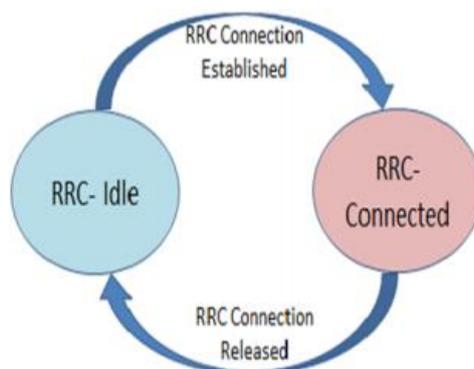


Figura 7.2 Estados RRC [53].

El protocolo RRC (*Radio Resource Control*) ubicado en el plano de control de la pila de protocolos de LTE, es el encargado de controlar el comportamiento del móvil cuando este se encuentra en el estado conectado. Los mensajes dedicados entre la capa RRC y las capas superiores se llevan a cabo mediante las portadoras radio de señalización que se comentarán en el siguiente capítulo.

Las principales funciones del protocolo RRC son:

- Difusión de la información de *broadcast*: Durante el proceso de registro en una red o paso de estado IDLE a CONNECTED, el UE necesita una información mínima común que se transmite mediante el conocido como Sistema de Información (MIB & SIB). El encargado de difundir esta información es la capa RRC.
- Control de la conexión RRC en todos los procedimientos relacionados con el establecimiento, mantenimiento y cierre de una conexión RRC.
- Gestión de movilidad entre tecnologías de acceso controladas por la red: movilidad, seguridad y transferencia de la información de contexto del UE.
- Gestión de los mecanismos y de la transferencia de la información en el caso de movilidad tanto entre tecnologías radio como inter e intra-frecuencia.

Más adelante, concretamente en el apartado 5.7, se mostrará un ejemplo real de un intercambio de mensajes entre el UE y el eNB con el programa analizador de paquetes Wireshark. Los paquetes analizados serán de capa MAC hacia arriba por lo que es necesario entender el transporte de información entre capas LTE.



Por ejemplo el MIB se transporta mediante el protocolo RRC en el canal lógico BCCH (Broadcast Control Channel):

4511	12.965002101	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=48)
------	--------------	-----------	-----------	------------------	------------------------------------

Y el SIB1 en el canal de transporte DL-SCH:

4514	12.965076429	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
------	--------------	-----------	-----------	----------------	--------------------------------

Mientras que el preámbulo al no ser un mensaje en el canal de datos al uso si no una señal física:

4569	13.016034137	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	59 RACH Preamble chosen for UE 0 (RAPID=21, attempt=0)
------	--------------	-----------	-----------	---------	--

- Diagrama por capas Downlink

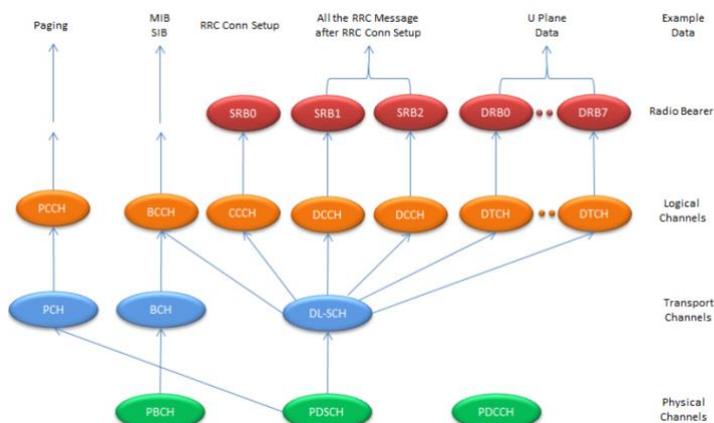


Figura 7.3 Diagrama Downlink de las capas en LTE [54].

- Diagrama por capas Uplink

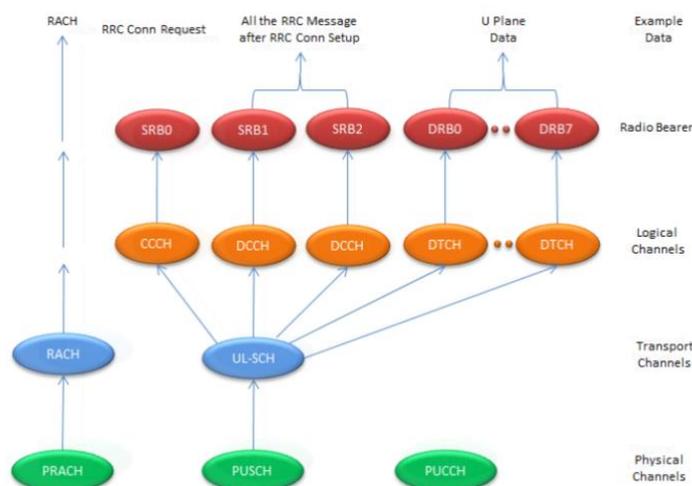


Figura 7.4 Diagrama Uplink de las capas en LTE [54].



- Esquema de mensajes durante attaching (Tabla 7.1):

Tabla 7.1. Mensajes RRC, NAS y EMS durante Attaching [27].

Mensaje	Radio Bearer	LoCH	LoCH No	LCID
MIB	-	BCCH	0	-
SIB1	-	BCCH	1	-
SIB2	-	BCCH	1	-
RRC: Preámbulo	-	-	-	-
RRC: Respuesta Preámbulo	-	-	-	-
RRC: RRC Connection Request	SRB0	UL DCCH	0	0
RRC: RRC Connection Setup	SRB0	DL DCCH	0	0
RRC: RRC Connection Setup				
NAS: Attach Request	SRB1	UL DCCH	0	1
ESM: PDN Connectivity Request				
RRC: DL Information Transfer	SRB1	DL DCCH	0	1
NAS: Authentication Request				
RRC: UL Information Transfer	SRB1	UL DCCH	0	1
NAS: Authentication Response				
RRC: DL Information Transfer	SRB1	DL DCCH	0	1
NAS: Security Mode Command				
RRC: UL Information Transfer	SRB1	UL DCCH	0	1
NAS: Security Mode Complete				
RRC: Security Mode Command	SRB1	DL DCCH	0	1
RRC: Security Mode Complete	SRB1	UL DCCH	0	1
RRC: Connection Reconfiguration	SRB1	DL DCCH	0	1
RRC: Connection Reconfiguration Complete	SRB1	UL DCCH	0	1
RRC: UL Information Transfer				
NAS: Attach Complete	SRB2	UL DCCH	1	2
NAS: Activate Default EPS Bearer				
RRC: UL Information Transfer	SRB2	UL DCCH	1	2
ESM: PDN Connectivity Request				

7.6. Bearers

En LTE se utilizan los conceptos conocidos como “Bearer” y “EPS Bearer”[55]. EPS Bearer se define como el flujo de paquetes IP entre UE y PDN Gateway con un nivel de QoS determinado.

EPS Bearer se refiere a una conexión virtual entre dos puntos. Por ejemplo: Equipo de Usuario (UE) con Red Pública (PDN)

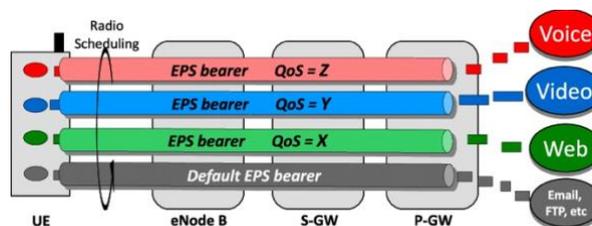


Figura 7.5 Bearers en LTE [55].



En una aplicación práctica donde en un UE corren múltiples aplicaciones, cada una tiene un determinado QoS. Por ejemplo se puede estar ejecutando al mismo tiempo una llamada de voz sobre IP (VoIP), navegación web a través de un navegador y una descarga de un archivo FTP. En este caso los requisitos de VoIP son más exigentes en términos de delay y jitter que el resto de servicios.

Para soportar estos múltiples requisitos, los “túneles” de comunicación se clasifican en dos grandes grupos [56]:

- GRB (Minimum Guaranteed Bit Rate) Bearers: los cuales tienen asociados recursos de transmisión permanentes que garantizan una tasa mínima. En el caso que haya recursos extra disponible esta tasa puede ser mayor.
- Non-GRB Bearers: no garantizan ninguna tasa mínima en particular.

En el acceso a red, es responsabilidad del eNodeB asegurar el QoS demandado por el Bearer. Para ello, cada Bearer es caracterizado por el identificador QCI (QoS Class Identifier).

Para asegurar a los operadores que tipo de tráfico van a tener que manejar se han estandarizado estos QCI. Tal y como se ha definido anteriormente, EPS Bearer es un enlace virtual entre dos puntos (end-to-end). Además de este enlace, existen “enlaces virtuales” entre las diferentes entidades que forman la red LTE.

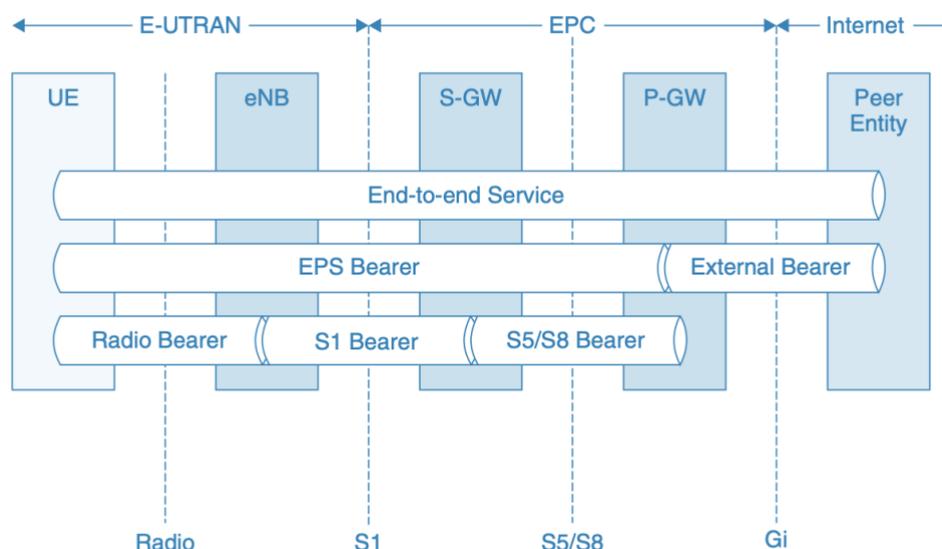


Figura 7.6 Radio Bearers en LTE [57].

Dentro de los Radio Bearers, dependiendo del tipo de tráfico se clasifican en:

- SRBs (Signalling Radio Bearers) para tráfico de datos de control (Plano de Control). Mas concretamente, en E-UTRAN se definen los siguientes 3 tipos de Signalling Radio Bearers:



- SRB0, mensajes RRC que usan el canal lógico CCCH, emplea RLC (Radio Link Control) en modo transparente (los datos se transportan sin alterarse) y se utiliza para las etapas de establecimiento en la conexión RRC.
- SRB1, mensajes RRC que usan el canal lógico DCCH, emplea RLC en modo acknowledged (se alteran los datos con cabeceras, fragmentaciones etc.) y en caso de no haberse implementado aun el SRB2 puede encapsular mensajes NAS.
- SRB2, mensajes RRC que usan el canal lógico DCCH, emplea RLC en modo acknowledged, se configura después de haber activado la seguridad en la capa y encapsula los mensajes NAS.

Tabla 7.2. Signalling Radio Bearers [49] .

Tipo de SRB	Dirección	Mensaje RRC	Modo RLC
0	Downlink	RRC Connection Setup RRC Connection Reject RRC Connection Re-establishment RRC Connection Re-establishment reject	Transparente
	Uplink	RRC Connection Request RRC Connection Re-establishment Request	
1	Downlink	RRC Connection Reconfiguration RRC Connection Release Security Mode Command UE Capability Enquiry DL Information Transfer (si no hay SRB2) Mobility from EUTRA Command Handover from EUTRA preparation Request CS Fallback parameter response CDMA2000 Counter Check	Acknowledged
	Uplink	RRC Connection Setup Complete Security Mode Complete Security Mode Failure RRC Connection Reconfiguration Complete RRC Connection Re-establishment Complete Measurement Report UE Capability Information UL Information Transfer (si no hay SRB2) UL Handover Preparation Transfer CS Fallback Parameters Request CDMA2000 Counter Check Response	
2	Downlink	DL Information Transfer	
	Uplink	UL Information Transfer	

- DRBs (Data Radio Bearers) para tráfico de datos de usuario (Plano de Usuario), por ejemplo paquetes IP.



Tabla 7.3. Data Radio Bearers. [49]

QCI	Recurso	Prioridad	Delay del paquete	Tasa de error	Servicios
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Conversación de voz
2		4	150 ms	10^{-3}	Conversación por video
3		3	50 ms	10^{-3}	Juegos a tiempo real
4		5	300 ms	10^{-6}	Video por streaming
65		0.7	75 ms	10^{-2}	Push to Talk Critical
66		2	100 ms	10^{-2}	Push to Talk
75		2.5	50 ms	10^{-2}	Mensajes V2X
5	No GBR	1	100 ms	10^{-6}	Señalización IMS
6		6	300 ms	10^{-6}	Video Streaming basado en TCP
7		7	100 ms	10^{-3}	Video, voz y juegos online
8		8	300 ms	10^{-6}	Video Streaming basado en TCP
9		9			
69		0.5	60 ms	10^{-6}	Señalización crítica
70		5.5	200 ms	10^{-6}	Datos críticos
79		6.5	50 ms	10^{-2}	Mensajes V2X



8

Primera recepción Downlink

Esta etapa consiste en la detección, demodulación y decodificación de una serie consecutiva de tramas Downlink provenientes de un eNB con el objetivo de obtener los parámetros que definen el tipo de transmisión y poder así preparar una respuesta Uplink. El UE realiza este mecanismo cuando se enciende, tras haber estado apagado o sin batería, o bien cuando detecta que la cobertura de la conexión actual empeora y se plantea un cambio de celda.

En primer lugar, es necesario detectar la PSS, para ello el UE fija una frecuencia central de una banda LTE, captura por la antena la señal y la muestrea a la frecuencia correspondiente. En el caso de no completar el punto 4.1.1 se modifica la frecuencia central para cambiar de banda y se repite el proceso. Debido a que las señales de sincronización y el PBCH se encuentran centrados en la frecuencia de dc a lo largo de 72 subportadoras se realiza un downsampling de la señal para acceder a dichos Resource Blocks.

Se utilizará una señal generada en Matlab del siguiente tipo a modo de ejemplo:

- Ancho de banda: 25 RB (5MHz).
- Cell ID: 123.
- Multiplexación: FDD.
- Prefijo cíclico: normal.
- N° de tramas: 8.

8.1. Sincronización

8.1.1. Número de celda

Se correlaciona la señal downsampleada con las 3 posibles secuencias Zadoff-Chu (2.3.1), si la correlación de alguna de ellas supera un umbral se escoge el número de celda con el cual se generó dicha Zadoff-Chu. El instante de tiempo en el que se produce el máximo en la correlación indica además el instante temporal en el que concluye el símbolo OFDM que contiene la PSS, lo que permite una sincronización temporal.

8.1.2. Prefijo cíclico

El prefijo cíclico es una repetición de las últimas muestras del símbolo OFDM, la cantidad de dichas muestras depende de si este tiene una configuración normal o extendida, una forma de conocer esta información es correlando las últimas muestras del símbolo OFDM que contiene la PSS. Conocer el prefijo cíclico es importante ya que para realizar la FFT a un



símbolo OFDM y recuperar los símbolos IQ es preciso no incluir las muestras correspondientes al prefijo cíclico.

8.1.3. Multiplexación

La ubicación de la SSS varía en función de si la multiplexación es FDD o TDD, se utiliza por tanto un método de prueba y error empezando con una configuración, por ejemplo, FDD, si alguna correlación resulta exitosa con la primera prueba se asume dicha multiplexación y se prosigue, en caso contrario se prueba con el símbolo OFDM que contendría la señal SSS en la otra configuración.

8.1.4. Subtrama

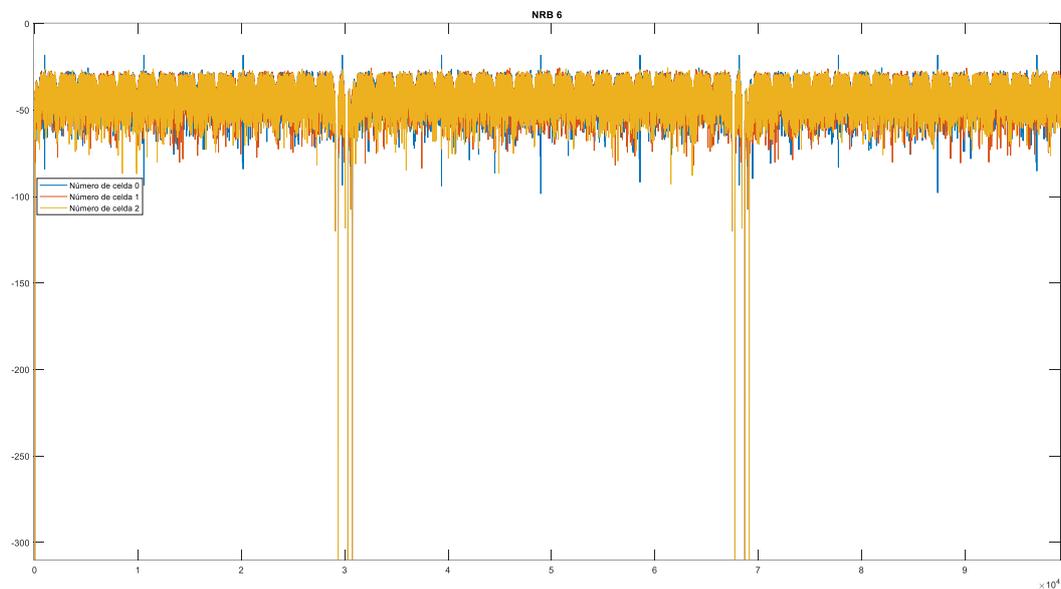
Las secuencias SSS varían en función de si están ubicadas en la subtrama 0 o en la subtrama 5, esto permite conocer al usuario en que subtrama se ha realizado la sincronización. El código que conforma una SSS son dos secuencias m concatenadas, para la subtrama 0 se coloca una delante de la otra y para la subtrama 5 a la inversa.

8.1.5. Grupo de celda

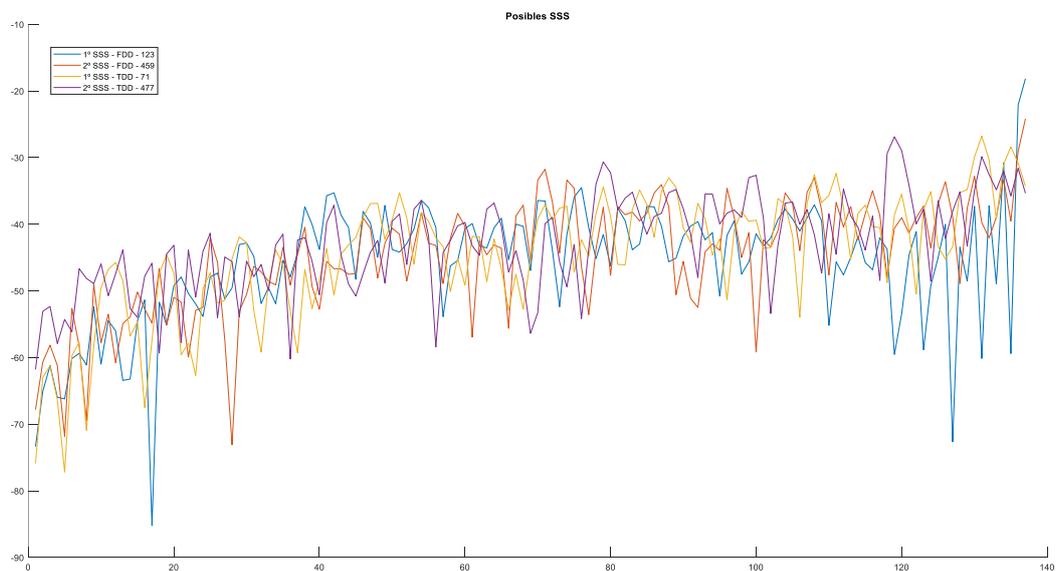
Se extrae el símbolo OFDM que contendría a la SSS en la multiplexación elegida y se correla con las 168 posibles secuencias asociadas a la subtrama 0, si una correlación supera el umbral se almacena el número de celda, la subtrama 0 y la multiplexación escogida. En caso contrario, se correla con las 168 posibles secuencias asociadas a la subtrama 5, en caso de que tampoco se supere un máximo se repite el proceso con el símbolo OFDM que contendría la SSS en la otra multiplexación.



8.1.6. Resultado correlaciones



(a)



(b)

Figura 8.1 Correlación PSS (a), Correlación SSS (b).

8.2. Master Information Block

8.2.1. Pilotos de referencia y ecualización

Se calcula el ID de celda con la fórmula (XXX) y se accede a los símbolos OFDM del canal PBCH en la señal downsampleada y se realiza una FFT para recuperar los símbolos IQ.

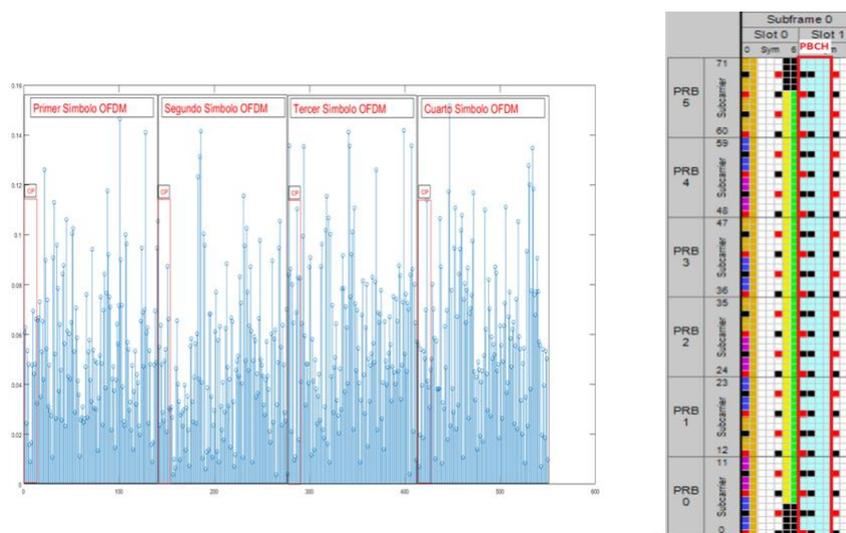


Figura 8.2 Símbolos OFDM del canal PBCH.

La mayor parte de dichos símbolos IQ corresponderán al MIB pero habrá otros que conformaran los pilotos de referencia (Resource Elements en color rojo de la figura 5.2), la posición de dichos pilotos se calcula mediante el ID de celda (2.3.3), el valor de estos es conocido a priori por el usuario y por tanto será posible realizar una estimación de canal y ecualizarlo (2.3.3).

8.2.2. PBCH

Una vez ecualizado el canal para las subportadoras y los símbolos OFDM del canal PBCH, se extraen los símbolos IQ del MIB y se demodulan en QPSK. Tras esto se realiza la decodificación:

- Scrambling con secuencia gold.
- Deshacer Rate-Matching.
- Deshacer código convolucional.

Tras esto se obtienen los 24 bits del MIB junto con los 16 bits de su CRC. El MIB completo ocupa 4 tramas y tiene un tamaño de 1920 bits con un prefijo cíclico normal y de 1728 bits para un prefijo cíclico extendido. La secuencia gold que se genera con el algoritmo especificado en el estándar tiene la misma longitud, sin embargo, al estar demodulando una



única trama el tamaño del MIB en este caso será de la cuarta parte, es decir, 480 o 432 bits respectivamente.

Esto quiere decir que, dependiendo de la trama, el MIB ha sido codificado mediante un scrambling con un trozo u otro de la secuencia gold, por tanto es necesario probar a decodificar el MIB recibido con los 4 trozos de la secuencia gold hasta obtener un CRC válido. Esto lo que proporciona son los dos bits menos significativos del número de trama, que servirán para completar los 8 bits más significativos que contiene directamente el MIB.

El CRC además contiene información sobre el número de antenas en transmisión (Tabla 8.1):

Tabla 8.1. Antenas en función del CRC del MIB.

Número de antenas en eNB	MIB CRC
1	<0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0>
2	<1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1>
4	<0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1>

Por tanto, de la decodificación del MIB se obtiene la siguiente información:

- Ancho de banda del sistema, bits 1,2 y 3 del MIB:
 - 0 0 0 – 1.25 MHz
 - 0 0 1 –
 - 0 1 0 – 5 MHz
 - 0 1 1 – 10 MHz
 - 1 0 0 – 15 MHz
 - 1 0 1 – 20 MHz
 - 1 1 0 –
 - 1 1 1 – 2.5 MHz
- Configuración del canal PHICH:
 - Bit 4 del MIB, especifica si el PHICH ocupa un símbolo OFDM o más.
 - Bits 5 y 6 del MIB, especifican el número de grupo PHICH que indica cuantas respuestas ACK/NACK pueden ir multiplexadas.
- Número de trama:
 - Bits 7 al 14 del MIB, especifican los 8 bits más significativos.
 - Trozo del scrambling para un CRC correcto, especifica los 2 bits menos significativos.



De cara a extraer el SIB1, si el número de trama especificado en el MIB es impar se descarta la señal y se espera la recepción de una trama par, esto es debido a que el SIB1 sólo se encuentra en las subtramas 5 de las tramas pares.

8.3. Control Format Indicator

8.3.1. PCFICH

El CFI indica el número máximo de símbolos OFDM que ocupan los canales de control en una subtrama.

Se extrae la subtrama 5 de la trama par y se accede al primer símbolo OFDM de dicha subtrama, en este se encuentran varios canales multiplexados, el PDCCH, el PHICH y el PCFICH. En primer lugar es necesario acceder a este último puesto que contiene el CFI y este especifica cuantos símbolos OFDM habrá que decodificar. Las fórmulas para ubicar los símbolos IQ del canal PCFICH se encuentran en la siguiente figura 8.3 que ilustra el apartado 6.7.4 del documento 36.211 [35]:

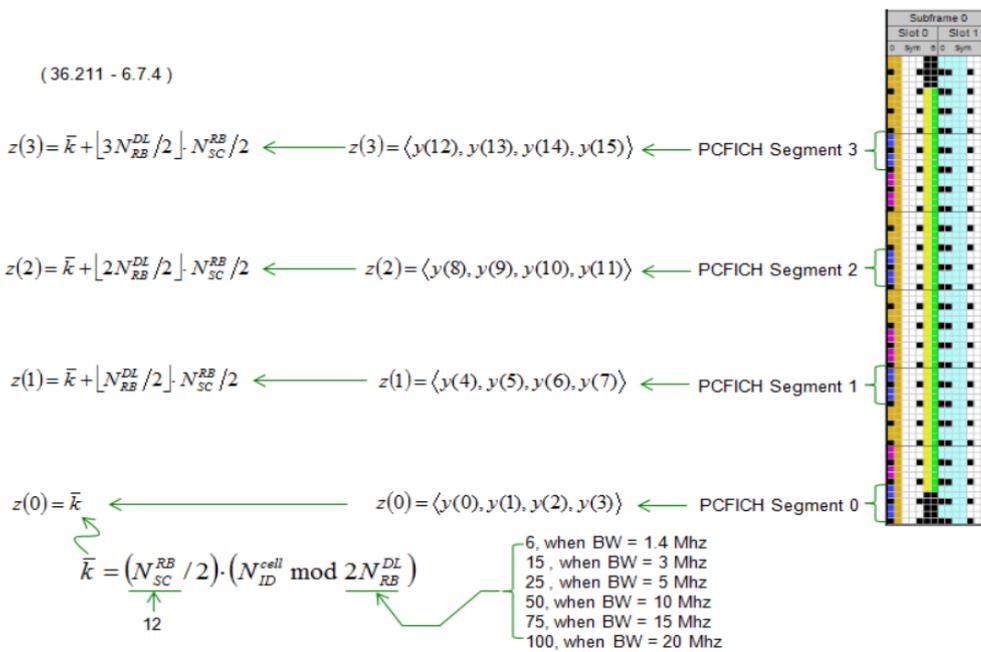


Figura 8.3 Resource Element Groups destinados al canal PCFICH [38].

Tras demodular los símbolos IQ se realiza un scrambling con una secuencia gold cuya semilla depende del ID de celda:

$$seed = \left(\left\lfloor \frac{n_s}{2} \right\rfloor + 1 \right) * (2 * ID_{celda} + 1) * 2^9 + ID_{celda} \tag{8.1}$$



Dónde n_s es el número de slot en la trama, variando desde 0 a 19, y tras esto se obtiene directamente el CFI, que indica el número de símbolos OFDM que ocupa el canal PDCCH tal y como muestra la tabla 5.1.

8.3.2. Grid Recuperado

Tras conocer la información del MIB y el CFI es posible recuperar el Grid de la señal Downlink.



Figura 8.4 Grid recuperado en interfaz visual Matlab.

8.4. Downlink Control Indicator

8.4.1. RNTI

El UE a priori no sabe si la subtrama que está decodificando contiene DCI específicos de usuario o broadcast, ni tampoco sabe que información transportan dichos DCI. Para todo esto se emplea un número identificador denominado Radio Network Temporary Identifier (RNTI), los RNTI son números de 16 bits que modifican el CRC del DCI mediante una operación XOR tal y como muestra la siguiente figura 8.5.

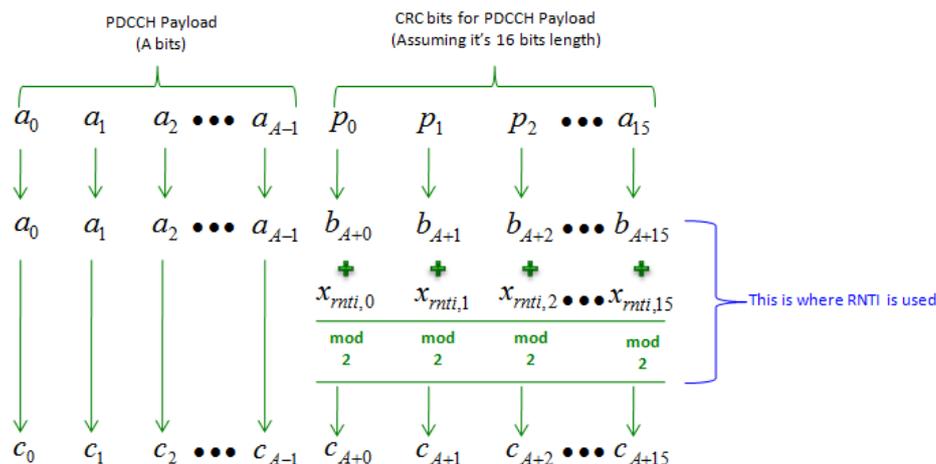


Figura 8.5 Scrambling RNTI con el CRC de un DCI [41].

Si se utiliza una técnica multi-antena, también se aplica una máscara de 16 bits específica de la antena transmisora sobre el resultado del CRC + RNTI.

Existen por tanto RNTI generales como el asociado a los SIB, denominado S-RNTI o el de la respuesta al preámbulo RAR, denominado RA-RNTI, y específicos para cada usuario denominados C-RNTI.

Un usuario por tanto debe decodificar el canal PDCCH hasta obtener la cadena de bits C especificada en la figura 4.1.6.3, aplicar un scrambling a los 16 últimos bits con el RNTI de la información que desea obtener y comprobar que el CRC resultante sea correcto, en cuyo caso recupera el DCI que estaba buscando.

El problema es que, tal y como se ha comentado anteriormente, el canal PDCCH puede tener un nivel de agregación u otro, lo que se traduce no sólo en la multiplexación de varios DCI si no en la longitud del Rate Matching aplicado. Por tanto, el usuario debe realizar una decodificación “ciega” sin conocer como ha sido generado el canal y empleando un método de prueba y error.

8.4.2. Decodificación ciega

El proceso de decodificación ciega o “blind decoding” es complicado y se ha delegado a la herramienta del toolbox LTE de Matlab debido al tiempo disponible para la realización de las prácticas en empresa, el DCI decodificado para la señal de Matlab es el siguiente:



Buscando SIB1 en la primera trama par

```

Detectado DCI con SI-RNTI:
  DCIFormat: 'Format1A'
  CIF: 0
  AllocationType: 0
  Allocation: [1x1 struct]
  ModCoding: 5
  HARQNo: 0
  NewData: 0
  RV: 0
  TPCPUCCH: 0
  TDDIndex: 0
  SRSRequest: 0
  HARQACKResOffset: 0

```

```

Información del DCI asociada al canal PDSCH:
  RNTI: 65535
  PRBSet: [8x1 uint64]
  NLayers: 1
  CSI: 'On'
  Modulation: {'QPSK'}
  RV: 0
  TxScheme: 'Port0'
  NTurboDeclts: 5

```

8.5. System Information Block

8.5.1. SIB1

En primer lugar, es necesario decodificar el SIB1, este SIB contiene información relativa a la ubicación del resto de los SIBs y se transmite siempre en la subtrama 5 de las tramas pares. Los SIBs van en el canal de datos PDSCH multiplexados junto con información específica de usuario, por tanto para acceder a los símbolos IQ pertinentes, así como conocer la modulación empleada es necesario primero decodificar el DCI asociado, tal y como se ha explicado anteriormente estos pueden ser formato 1A o 1C con un S-RNTI.

Tras decodificar los símbolos IQ pertinentes y obtener el SIB1 es necesario convertirlo a hexadecimal para su parseo ASN1. Esto es debido a que la información que transporta el SIB2 no está representada de forma directa en sus bits (como en el caso del MIB), si no que con ellos se construye una estructura estilo JSON dónde los parámetros se especifican en texto plano, el SIB1 extraído de la señal de Matlab es el siguiente:

“684850073F3AC56A91582354C8020610B089846C24655000000000000”

Cuyo parseo genera la siguiente estructura:



```

<BCCH-DL-SCH-Message>
  <message>
    <c1>
      <systemInformationBlockType1>
        <cellAccessRelatedInfo>
          <plmn-IdentityList>
            <PLMN-IdentityInfo>
              <plmn-Identity>
                <mcc>
                  <MCC-MNC-Digit>2</MCC-MNC-Digit>
                  <MCC-MNC-Digit>1</MCC-MNC-Digit>
                  <MCC-MNC-Digit>4</MCC-MNC-Digit>
                </mcc>
                <mnc>
                  <MCC-MNC-Digit>0</MCC-MNC-Digit>
                  <MCC-MNC-Digit>7</MCC-MNC-Digit>
                </mnc>
              </plmn-Identity>
            </PLMN-IdentityInfo>
            <cellReservedForOperatorUse>
              <notReserved/>
            </cellReservedForOperatorUse>
          </PLMN-IdentityInfo>
        </plmn-IdentityList>
        <trackingAreaCode>0000011001000001</trackingAreaCode>
        <cellIdentity>0000001001110110110000011111</cellIdentity>
        <cellBarred>
          <notBarred/>
        </cellBarred>
        <intraFreqReselection>
          <allowed/>
        </intraFreqReselection>
      <csg-Indication>
        <false/>
      </csg-Indication>
    </cellAccessRelatedInfo>
    <cellSelectionInfo>
      <q-RxLevMin>-61</q-RxLevMin>
    </cellSelectionInfo>
    <p-Max>23</p-Max>
    <freqBandIndicator>20</freqBandIndicator>
    <schedulingInfoList>
      <SchedulingInfo>
        <si-Periodicity>
          <rf8/>
        </si-Periodicity>
      </SchedulingInfo>
      <SchedulingInfo>
        <si-Periodicity>
          <rf64/>
        </si-Periodicity>
      </SchedulingInfo>
      <SchedulingInfo>
        <si-Periodicity>
          <rf64/>
        </si-Periodicity>
      </SchedulingInfo>
      <SchedulingInfo>
        <si-Periodicity>
          <rf64/>
        </si-Periodicity>
      </SchedulingInfo>
    </schedulingInfoList>
  </c1>
</message>

```



```

    </sib-MappingInfo>
  </SchedulingInfo>
  <SchedulingInfo>
    <si-Periodicity>
      <rf64/>
    </si-Periodicity>
    <sib-MappingInfo>
      <sibType6/>
    </sib-MappingInfo>
  </SchedulingInfo>
</schedulingInfoList>
<si-WindowLength>
  <ms10/>
</si-WindowLength>
<systemInfoValueTag>1</systemInfoValueTag>
</systemInformationBlockType1>
</c1>
</message>
</BCCH-DL-SCH-Message>

```

Se puede apreciar que este SIB1 contiene información hasta el SIB6, eso quiere decir que en esta comunicación no se emplean SIBs con número superior al 6, en esta etapa sin embargo sólo es necesario decodificar el SIB2, puesto que es el SIB que contiene la información relativa a la construcción del preámbulo para la respuesta Uplink.

El SIB1 contiene dos parámetros para una ubicación relativa de los SIBs, el primero es de carácter general para todos los SIBs (que no sean el SIB1 evidentemente) y es la ventana temporal o Window Length, este parámetro especifica el tiempo a partir de cierto instante en el que puede manifestarse un SIB, para este ejemplo dicho valor es de 10 ms, esto quiere decir que tomando cierto instante como momento inicial cualquier SIB estará entre dicho instante inicial y los 10 ms posteriores.

El siguiente parámetro es la periodicidad o Periodicity, este indica el momento inicial en el cual puede aparecer un SIB comentado anteriormente, en este ejemplo la periodicidad para el SIB2 y el SIB3 es de rf8, lo que significa que aparece cada 8 tramas. La trama exacta se calcula con las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}
 n &= n^{\circ} \text{ de SIB} \\
 x &= (n - 1) * w \\
 a &= x \bmod 10 \\
 SFN \bmod T &= \left\lfloor \frac{x}{10} \right\rfloor
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$

Dónde n es el orden de entrada en la lista de mensajes configurado por schedulingInfoList (no he visto aun un n distinto de 1) número de w es la ventana temporal (si-WindowLength) en ms y T es la periodicidad en número de tramas (si-Periodicity). Cada variable expresa una condición temporal, para su explicación se proseguirá con el ejemplo de SIB1 mostrado anteriormente.

$$\begin{aligned}
 n &= 1 \\
 x &= 0 \\
 a &= 0 \\
 SFN \bmod 8 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{8.3}$$



El inicio de la monitorización del mensaje que contiene el SIB2 y el SIB3 empieza en la subtrama **a** de la trama que cumpla condición de la última fórmula y se extiende el tiempo indicado por $si\text{-WindowLength}$, es decir, para el ejemplo el mensaje que contiene el SIB2 y el SIB3 podrá estar en cualquier subtrama de las tramas con SFN múltiplo de 8 (siempre se excluye la subtrama 5 de las tramas pares puesto que ahí tiene que ir siempre un SIB1).

8.5.2. SIB2

El usuario buscará DCIs que contengan el SI-RNTI en todas las subtramas durante el periodo de búsqueda del SIB2, cuando lo encuentre utilizará su información para extraer los símbolos IQ en el canal PDSCH del SIB2, demodularlos y decodificarlos.

El resultado de la búsqueda del DCI para el SIB2 empleando el toolbox de Matlab es el siguiente:

```
-----
Buscando SIB2 en la primera trama cuyo número de trama cumpla  $SFN \bmod 8 == 0$ 
Iniciando búsqueda desde la subtrama 0 a lo largo de 10 subtramas
-----
Detectado DCI con SI-RNTI:
  DCIFormat: 'Format1A'
  CIF: 0
  AllocationType: 0
  Allocation: [1x1 struct]
  ModCoding: 5
  HARQNo: 0
  NewData: 0
  RV: 2
  TPCPUCCH: 0
  TDDIndex: 0
  SRSRequest: 0
  HARQACKResOffset: 0

Información del DCI asociada al canal PDSCH:
  RNTI: 65535
  PRBSet: [8x1 uint64]
  NLayers: 1
  CSI: 'On'
  Modulation: {'QPSK'}
  RV: 2
  TxScheme: 'Port0'
  NTurboDecIts: 5

Decodificando SIB...
Es un SIB1, descartado y se prosigue la búsqueda

Detectado DCI con SI-RNTI:
  DCIFormat: 'Format1A'
  CIF: 0
  AllocationType: 0
  Allocation: [1x1 struct]
  ModCoding: 10
  HARQNo: 0
  NewData: 0
  RV: 2
```



```

TPCPUCCH: 0
TDDIndex: 0
SRSRequest: 0
HARQACKResOffset: 0

Información del DCI asociada al canal PDSCH:
RNTI: 65535
PRBSet: [8x1 uint64]
NLayers: 1
CSI: 'On'
Modulation: {'QPSK'}
RV: 2
TxScheme: 'Port0'
NTurboDecIts: 5

Decodificando SIB...

SIB2 recuperado en la subtrama 2 de la trama 3

```

El SIB2 como todos los SIB también precisa de un parseo de su contenido hexadecimal para obtener los parámetros en texto, el SIB2 de la señal en Matlab es:

```

“008309F2B7EC527E2B01CC000C00040022072B8A55782D003280300AF7600314200
0780224A39446AF2000000000000”

```

Cuyo parseo genera la siguiente estructura:

```

<BCCH-DL-SCH-Message>
  <message>
    <c1>
      <systemInformation>
        <criticalExtensions>
          <systemInformation-r8>
            <sib-TypeAndInfo>
              <sib2>
                <radioResourceConfigCommon>
                  <rach-ConfigCommon>
                    <preambleInfo>
                      <numberOfRA-Preambles>
                        <n52/>
                      </numberOfRA-Preambles>
                    </preambleInfo>
                    <powerRampingParameters>
                      <powerRampingStep>
                        <dB4/>
                      </powerRampingStep>
                      <preambleInitialReceivedTargetPower>
                        <dBm-110/>
                      </preambleInitialReceivedTargetPower>
                    </powerRampingParameters>
                    <ra-SupervisionInfo>
                      <preambleTransMax>
                        <n10/>
                      </preambleTransMax>
                      <ra-ResponseWindowSize>
                        <sf10/>
                      </ra-ResponseWindowSize>
                    <mac-ContentionResolutionTimer>

```



```

        <sf64/>
        </mac-ContentionResolutionTimer>
    </ra-SupervisionInfo>
    <maxHARQ-Msg3Tx>4</maxHARQ-Msg3Tx>
</rach-ConfigCommon>
<bcch-Config>
    <modificationPeriodCoeff>
        <n2/>
    </modificationPeriodCoeff>
</bcch-Config>
<pcch-Config>
    <defaultPagingCycle>
        <rf64/>
    </defaultPagingCycle>
    <nB>
        <oneT/>
    </nB>
</pcch-Config>
<prach-Config>
    <rootSequenceIndex>740</rootSequenceIndex>
    <prach-ConfigInfo>
        <prach-ConfigIndex>19</prach-ConfigIndex>
        <highSpeedFlag>
            <false/>
        </highSpeedFlag>
        <zeroCorrelationZoneConfig>13</zeroCorrelationZoneConfig>
        <prach-FreqOffset>2</prach-FreqOffset>
    </prach-ConfigInfo>
</prach-Config>
<pdsch-ConfigCommon>
    <referenceSignalPower>16</referenceSignalPower>
    <p-b>0</p-b>
</pdsch-ConfigCommon>
<pusch-ConfigCommon>
    <pusch-ConfigBasic>
        <n-SB>1</n-SB>
        <hoppingMode>
            <interSubFrame/>
        </hoppingMode>
        <pusch-HoppingOffset>0</pusch-HoppingOffset>
        <enable64QAM>
            <true/>
        </enable64QAM>
    </pusch-ConfigBasic>
    <ul-ReferenceSignalsPUSCH>
        <groupHoppingEnabled>
            <true/>
        </groupHoppingEnabled>
        <groupAssignmentPUSCH>0</groupAssignmentPUSCH>
        <sequenceHoppingEnabled>
            <false/>
        </sequenceHoppingEnabled>
        <cyclicShift>0</cyclicShift>
    </ul-ReferenceSignalsPUSCH>
</pusch-ConfigCommon>
<pucch-ConfigCommon>
    <deltaPUCCH-Shift>
        <ds1/>
    </deltaPUCCH-Shift>
    <nRB-CQI>1</nRB-CQI>
    <nCS-AN>0</nCS-AN>
    <n1PUCCH-AN>8</n1PUCCH-AN>
</pucch-ConfigCommon>
<soundingRS-UL-ConfigCommon>
    <release/>
</soundingRS-UL-ConfigCommon>

```



```

<uplinkPowerControlCommon>
  <p0-NominalPUSCH>-80</p0-NominalPUSCH>
  <alpha>
    <al08/>
  </alpha>
  <p0-NominalPUCCH>-117</p0-NominalPUCCH>
  <deltaFList-PUCCH>
    <deltaF-PUCCH-Format1>
      <deltaF0/>
    </deltaF-PUCCH-Format1>
    <deltaF-PUCCH-Format1b>
      <deltaF3/>
    </deltaF-PUCCH-Format1b>
    <deltaF-PUCCH-Format2>
      <deltaF0/>
    </deltaF-PUCCH-Format2>
    <deltaF-PUCCH-Format2a>
      <deltaF0/>
    </deltaF-PUCCH-Format2a>
    <deltaF-PUCCH-Format2b>
      <deltaF0/>
    </deltaF-PUCCH-Format2b>
  </deltaFList-PUCCH>
  <deltaPreambleMsg3>6</deltaPreambleMsg3>
</uplinkPowerControlCommon>
<ul-CyclicPrefixLength>
  <len1/>
</ul-CyclicPrefixLength>
<uplinkPowerControlCommon-v1020>
  <deltaF-PUCCH-Format3-r10>
    <deltaF0/>
  </deltaF-PUCCH-Format3-r10>
  <deltaF-PUCCH-Format1bCS-r10>
    <deltaF2/>
  </deltaF-PUCCH-Format1bCS-r10>
</uplinkPowerControlCommon-v1020>
<pusch-ConfigCommon-v1270>
  <enable64QAM-v1270>
    <true/>
  </enable64QAM-v1270>
</pusch-ConfigCommon-v1270>
</radioResourceConfigCommon>
<ue-TimersAndConstants>
  <t300>
    <ms400/>
</t300>
  <t301>
    <ms400/>
  </t301>
  <t310>
    <ms2000/>
  </t310>
  <n310>
    <n20/>
  </n310>
  <t311>
    <ms5000/>
  </t311>
  <n311>
    <n1/>
  </n311>
</ue-TimersAndConstants>
<freqInfo>
  <additionalSpectrumEmission>1</additionalSpectrumEmission>
</freqInfo>
<timeAlignmentTimerCommon>

```



```
<infinity/>
</timeAlignmentTimerCommon>
</sib2>
<sib3>
  <cellReselectionInfoCommon>
    <q-Hyst>
      <dB4/>
    </q-Hyst>
  </cellReselectionInfoCommon>
  <cellReselectionServingFreqInfo>
    <s-NonIntraSearch>2</s-NonIntraSearch>
    <threshServingLow>2</threshServingLow>
    <cellReselectionPriority>5</cellReselectionPriority>
  </cellReselectionServingFreqInfo>
  <intraFreqCellReselectionInfo>
    <q-RxLevMin>-62</q-RxLevMin>
    <p-Max>23</p-Max>
    <allowedMeasBandwidth>
      <mbw50/>
    </allowedMeasBandwidth>
    <presenceAntennaPort1>
      <true/>
    </presenceAntennaPort1>
    <neighCellConfig>10</neighCellConfig>
    <t-ReselectionEUTRA>2</t-ReselectionEUTRA>
  </intraFreqCellReselectionInfo>
</sib3>
  </sib-TypeAndInfo>
</systemInformation-r8>
</criticalExtensions>
</systemInformation>
</c1>
</message>
</BCCH-DL-SCH-Message>
```



9

Proceso Random Access

9.1. Preámbulo

Los siguientes pasos de la comunicación pueden resumirse en el siguiente esquema de la Figura 9.1:

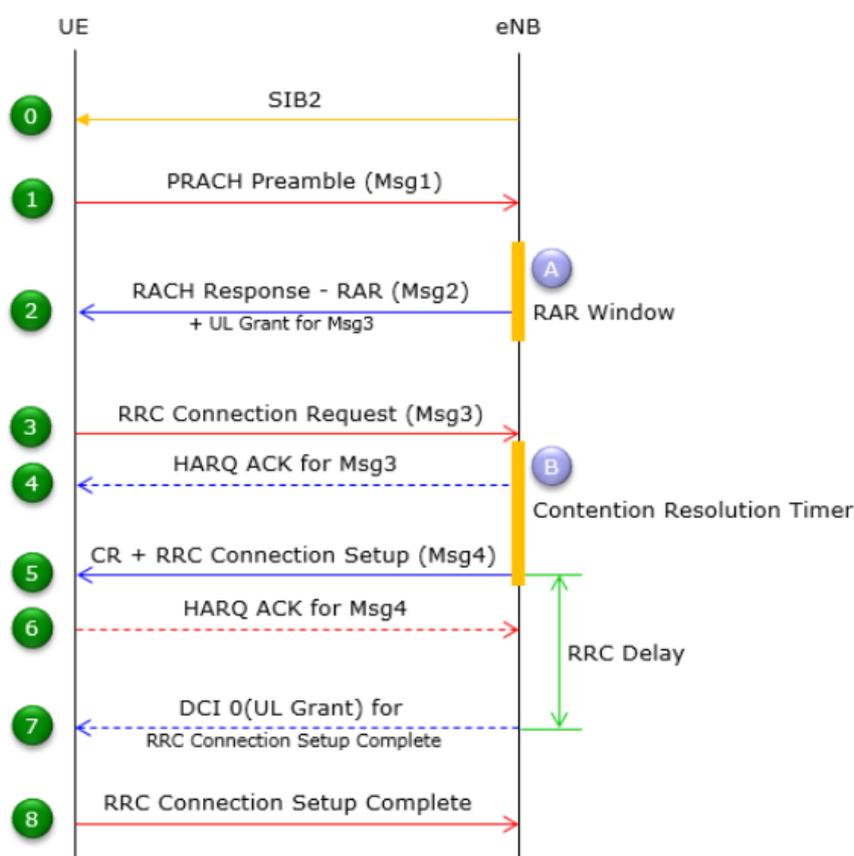


Figura 9.1 Diagrama de mensajes para attaching a celda entre UE y eNB [58].

El usuario genera una respuesta Uplink sin más contenido que el preámbulo, el cual se transporta en el canal físico PRACH, este es una secuencia Zadoff-Chu. Existen 64 secuencias disponibles por celda LTE aunque estas se dividen en dos grupos en el eNB, el grupo A especifica las secuencias disponibles mientras que el grupo B especifica las secuencias libres de contención, estas últimas se utilizan para evitar que dos usuarios puedan



escoger en la misma ventana temporal el mismo preámbulo y generar conflicto y están reservadas para operaciones dónde el delay es crítico como por ejemplo un cambio de celda, dónde se pretende mantener la cobertura.

Otra representación del SIB2 en forma de árbol sería el de la siguiente Figura 9.2:

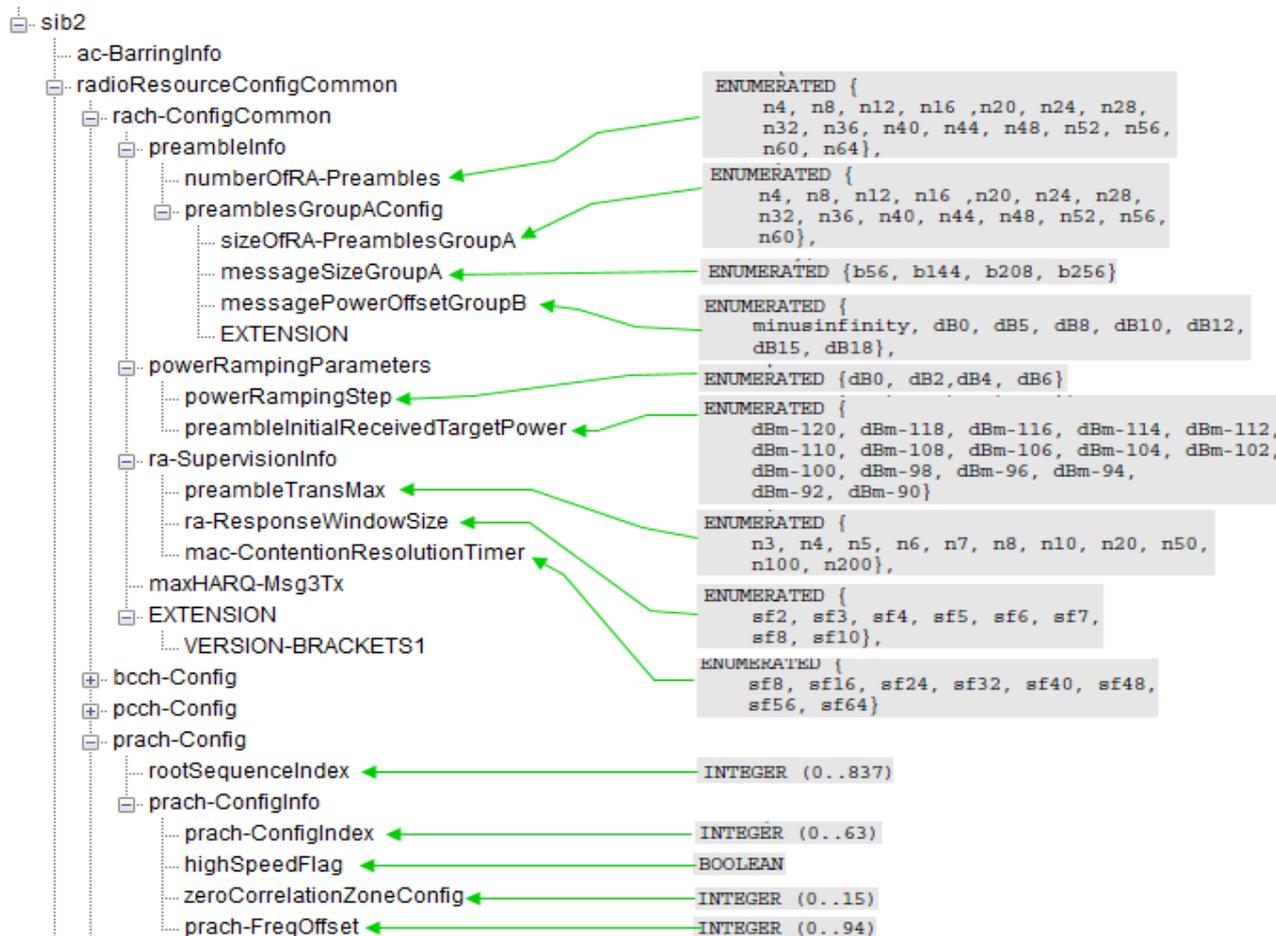


Figura 9.2 Ejemplo de SIB2 en forma de árbol [37].

El usuario escoge por tanto una secuencia Zadoff-Chu de las disponibles al azar, sin embargo, la ubicación de dicha secuencia está especificada por parámetros contenidos en el SIB2. Dicha ubicación se explica en el siguiente apartado.

La subtrama en la cual se envía el preámbulo viene especificada por el parámetro ConfigIndex (19 para el ejemplo mostrado anteriormente) según la siguiente tabla 9.1:



Tabla 9.1. Subtrama que transporta el preámbulo en función del valor ConfigIndex.

PRACH Configuration Index	Formato Preámbulo	SFN	Subtrama	PRACH Configuration Index	Formato Preámbulo	SFN	Subtrama
0	0	Pares	1	32	2	Pares	1
1	0	Pares	4	33	2	Pares	4
2	0	Pares	7	34	2	Pares	7
3	0	Cualquiera	1	35	2	Cualquiera	1
4	0	Cualquiera	4	36	2	Cualquiera	4
5	0	Cualquiera	7	37	2	Cualquiera	7
6	0	Cualquiera	1, 6	38	2	Cualquiera	1, 6
7	0	Cualquiera	2, 7	39	2	Cualquiera	2, 7
8	0	Cualquiera	3, 8	40	2	Cualquiera	3, 8
9	0	Cualquiera	1, 4, 7	41	2	Cualquiera	1, 4, 7
10	0	Cualquiera	2, 5, 8	42	2	Cualquiera	2, 5, 8
11	0	Cualquiera	3, 6, 9	43	2	Cualquiera	3, 6, 9
12	0	Cualquiera	0, 2, 4, 6, 8	44	2	Cualquiera	0, 2, 4, 6, 8
13	0	Cualquiera	1, 3, 5, 7, 9	45	2	Cualquiera	1, 3, 5, 7, 9
14	0	Cualquiera	Todas	46	N/A	N/A	N/A
15	0	Pares	9	47	2	Pares	9
16	1	Pares	1	48	3	Pares	1
17	1	Pares	4	49	3	Pares	4
18	1	Pares	7	50	3	Pares	7
19	1	Cualquiera	1	51	3	Cualquiera	1
20	1	Cualquiera	4	52	3	Cualquiera	4
21	1	Cualquiera	7	53	3	Cualquiera	7
22	1	Cualquiera	1, 6	54	3	Cualquiera	1, 6
23	1	Cualquiera	2, 7	55	3	Cualquiera	2, 7
24	1	Cualquiera	3, 8	56	3	Cualquiera	3, 8
25	1	Cualquiera	1, 4, 7	57	3	Cualquiera	1, 4, 7
26	1	Cualquiera	2, 5, 8	58	3	Cualquiera	2, 5, 8
27	1	Cualquiera	3, 6, 9	59	3	Cualquiera	3, 6, 9
28	1	Cualquiera	0, 2, 4, 6, 8	60	N/A	N/A	N/A
29	1	Cualquiera	1, 3, 5, 7, 9	61	N/A	N/A	N/A
30	N/A	N/A	N/A	62	N/A	N/A	N/A
31	1	Pares	9	63	3	Pares	9

En esas subtramas las subportadoras exactas que contendrán el preámbulo vienen dadas por los siguientes parámetros y fórmulas.

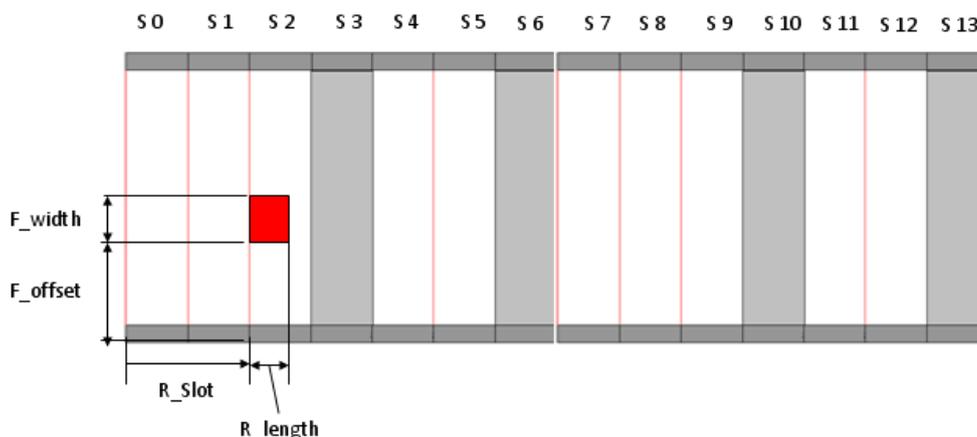


Figura 9.3 Ubicación del preámbulo RACH [37].

- R_slot lo indica el parámetro del SIB2 ConfigIndex.
- F_offset depende del parámetro del SIB2 FreqOffset:
 - FDD

$$F_{offset} = F_{FreqOffset} \quad (9.1)$$

- TDD

$$F_{offset} = \begin{cases} F_{FreqOffset} + 6 \left\lfloor \frac{f_{RA}}{2} \right\rfloor & \text{si } f \bmod 2 = 0 \\ N_{RB}^{UL} - 6 - F_{FreqOffset} - 6 \left\lfloor \frac{f_{RA}}{2} \right\rfloor & \text{resto} \end{cases} \quad (9.2)$$

Dónde f_{RA} es un parámetro que depende del ConfigIndex tal y como muestra la tabla 5.7.1-4 del documento 36.211 del estándar.

- R_length, tal y como muestra la Figura 9.3, es la duración total en tiempo. Por tanto, es la suma de T_CP (prefijo cíclico) + T_SEQ (secuencia) + Guard Time.

Tabla 9.2. Duraciones temporales de los formatos de preámbulo.

Formato Preámbulo	T_CP (ms)	T_SEQ (ms)	Longitud (ms)	GT (ms)	R_length (ms)	Radio Celda (km)
0	0.103	0.800	0.903	0.097	1	~ 14
1	0.684	0.800	1.484	0.516	2	~ 75
2	0.203	1.600	1.803	0.197	2	~ 28
3	0.684	1.600	2.284	0.716	3	~ 108

- F_width es constante y se extrapola del número de subportadoras que ocupa el preámbulo (839) y el espacio entre dichas subportadoras (1250 Hz).



La generación del preámbulo completo a partir de todos estos parámetros está ahora mismo delegada en las funciones del toolbox.

9.2. Respuesta al preámbulo

En esta recepción los primeros pasos a seguir serán los mismos que en el apartado 4.1 ya que será necesario detectar y sincronizar la trama, sin embargo, en este caso el mensaje a buscar en el canal PDSCH será la respuesta al preámbulo. El usuario tendrá que esperar 4 ms tras enviar el preámbulo (4 subtramas) y monitorizar un PDCCH con un RA-RNTI durante una ventana temporal especificada en el SIB2 con el parámetro ra-ResponseWindowSize.

9.2.1. DCI con RA-RNTI

El DCI que contendrá la información de como ubicar y decodificar la respuesta al preámbulo será ahora el que contenga el RA-RNTI en su CRC. Este RNTI es variable y se calcula:

$$RNTI_{RA} = 1 + t_{id} + 10 * f_{id} \quad (9.3)$$

Dónde t_{id} es el número de la primera subtrama dónde el usuario envió el preámbulo (0~9) y f_{id} el índice del PRACH en dicha subtrama (0~6), siendo 0 para una multiplexación FDD como se especifica en la página 19 de [59].

9.2.2. RARM

La respuesta al preámbulo contiene información sin necesidad de un parseo, cada bit expresa un parámetro acorde a la Figura 9.4:

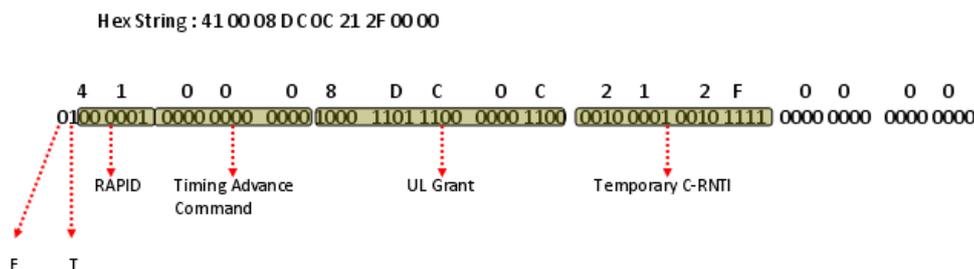


Figura 9.4 Ejemplo de respuesta al preámbulo [37].

Descomponiendo cada una de las partes:

- RAPID
 - E: fijado siempre a 0.
 - T: fijado siempre a 1.
 - Resto de bits: Índice del preámbulo escogido por el usuario.
- Timing Advance Command (TAC)
 - R, primer bit, no se aun que especifica.
 - 11 bits que especifican el offset entre la transmisión y la recepción de la trama.



El TAC en la respuesta al preámbulo indica un valor $T_A(0, 1, 2 \dots 1282)$ el cual se emplea para controlar el ajuste temporal que el equipo usuario tiene que aplicar. La cantidad de dicha corrección viene dada por $N_{TA} = T_A * 16 * T_s$ dónde T_s es el periodo de símbolo.

- UL Grant

Indica al usuario como y cuando enviar los datos por el canal Uplink PUSCH para la siguiente transmisión, cada vez que el usuario desea mandar datos por el canal PUSCH precisa primero de un UL grant de la estación base.

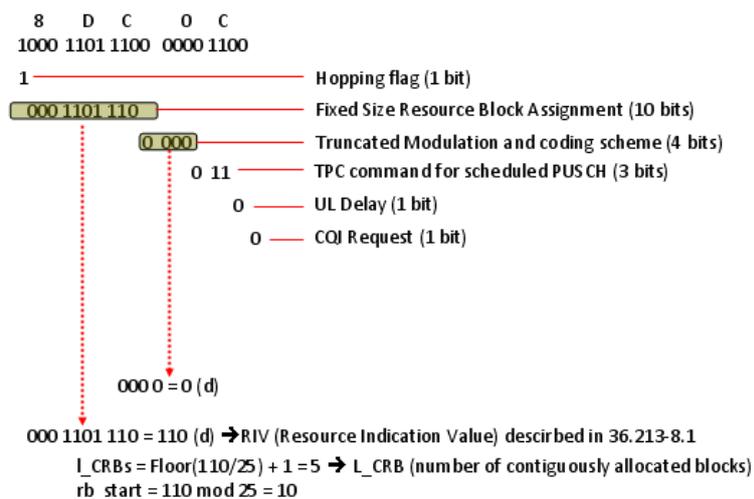


Figura 9.5 Ejemplo de UL grant en respuesta al preámbulo [58].

- Temporary C-RNTI

- Lo asigna el eNB al usuario y será su identificador para posteriores mensajes.

Este proceso en el cual la estación base indica al usuario cómo y cuándo transmitir los datos por el canal PUSCH se repite a lo largo de toda la comunicación LTE. La diferencia respecto a esta etapa es que el usuario solicitará el UL grant mediante un Scheduling Request en el UCI y la estación base responderá con un DCI formato 0 similar al UL grant del proceso RACH.



10

Proceso Radio Resource Control

A partir de este punto en la comunicación, la información transmitida pasa a capas más altas por lo que los ejemplos que se mostrarán no pertenecen a simulaciones de Matlab si no a una comunicación real cuyos paquetes han sido capturados mediante el programa “Wireshark”.

Este documento sólo alcanza hasta el establecimiento de la conexión RRC entre el UE y el eNB, sin embargo, hay muchos otros protocolos superiores, así como más entidades que conforman la red LTE.

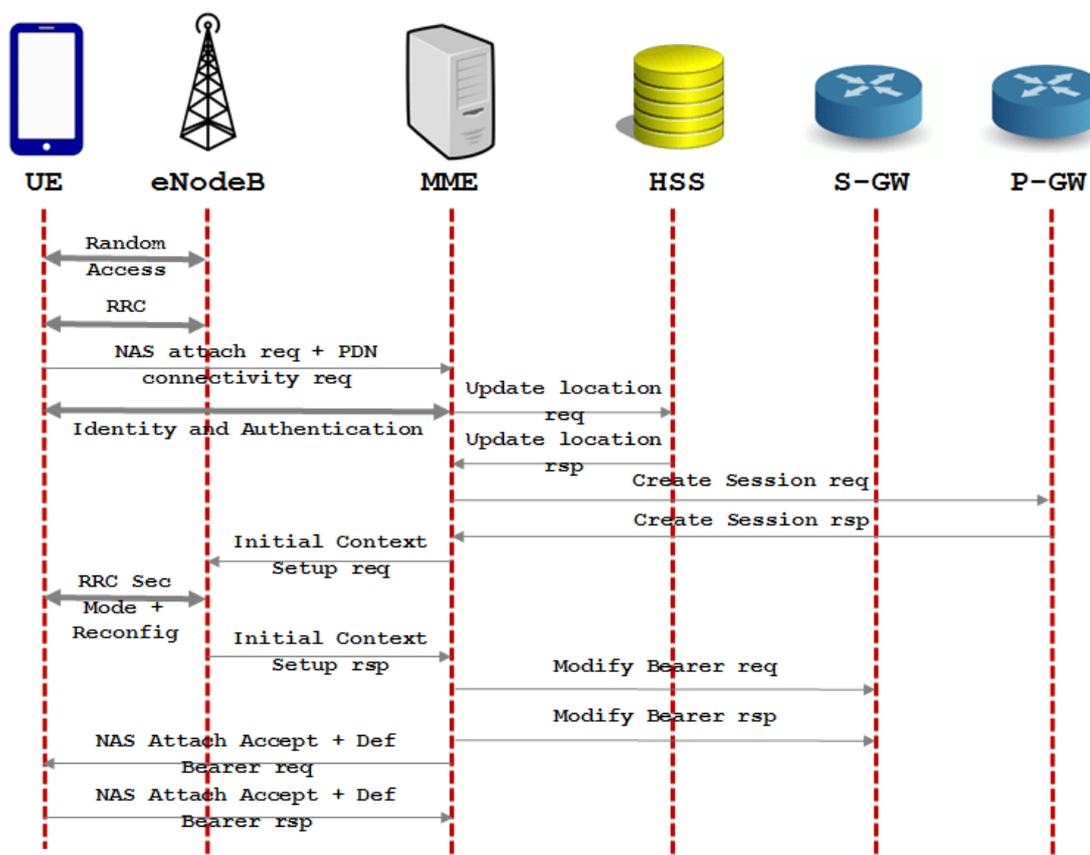


Figura 10.1 Diagrama de mensajes entre entidades que componen la red LTE [60].

A continuación, se muestra un fragmento (Figura 10.2) de los paquetes capturados con Wireshark que corresponde a la recepción periódica de los MIB y SIB así como el proceso de attaching a la celda.



4047	11.709189670	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=55)
4050	11.718483717	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=56)
4053	11.720794020	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4056	11.723123302	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=56)
4059	11.725352346	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94 SystemInformation [SIB2 SIB3]
4062	11.727599207	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=56)
4065	11.728771577	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4068	11.730949123	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=56)
4071	11.736478461	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=57)
4074	11.737664595	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4077	11.740919670	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=57)
4080	11.745339285	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=57)
4084	11.749443776	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4086	11.749475531	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	59 RACH Preamble chosen for UE 0 (RAPID=8, attempt=0)
4089	11.759356350	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	66 RAR (RA-RNTI=2, SFN=998, SF=6) (RAPID=8: TA=0, UL-Grant=844, Temp C-RNTI=48551)
4092	11.760939725	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=57)
4096	11.765507945	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_CCCH	77 RRCConnectionRequest
4098	11.765550522	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_CCCH	100 RRCConnectionSetup
4101	11.766733999	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=58)
4104	11.770108927	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4107	11.773461533	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=58)
4110	12.275563514	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	122 [UL] [AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [56-bytes..]
4113	12.275627240	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94 SystemInformation [SIB2 SIB3]
4116	12.288344496	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=58)
4119	12.289738359	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	81 RRCConnectionSetupComplete, Attach request, PDN connectivity request
4122	12.289796992	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	70 [DL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=2
4125	12.290860378	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4128	12.294400805	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=58)
4131	12.300812245	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=59)
4134	12.301924705	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	106 [DL] [AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [42-bytes..]
4137	12.301987395	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_DCCH/NAS-EPS	70 DLInformationTransfer, Authentication request
4140	12.302085965	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4143	12.305622519	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	122 UL-SCH: (SFN=1004, SF=5) UEId=0 (Power Headroom Report) (Long BSR) (Padding:remainder)
4146	12.306757743	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=59)
4149	12.312334789	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=59)
4152	12.313455376	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	122 [UL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=2 , ULInformationTransfer, Authentication response
4155	12.313523924	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	63 [DL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=3
4158	12.314551344	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4161	12.315676769	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_DCCH/NAS-EPS	87 DLInformationTransfer, Security mode command
4164	12.335553778	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=59)
4167	12.353096886	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=60)
4170	12.354163491	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	122 [UL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=3 , ULInformationTransfer, Security mode complete
4173	12.354289181	127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	63 [DL] [AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=4
4176	12.355299468	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
4179	12.363482073	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=60)
4182	12.374396514	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_DCCH	72 SecurityModeCommand
4185	12.376623427	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94 SystemInformation [SIB2 SIB3]
4188	12.378848288	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=60)
4191	12.381093061	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1

Figura 10.2 Captura de paquetes LTE en Wireshark mostrando proceso de attaching a celda.

10.1. RRC Connection Request

El mensaje de RRC Request consiste en una cadena de 40 bits con la identificación del usuario a nivel RRC. Esta cadena puede generarse de forma aleatoria o escoger el S-TMSI (Serving Temporary Mobile Subscriber Identity) de capas superiores si está disponible.

La ubicación de dicho mensaje en el canal PUSCH vendrá especificada en el UL grant recibido en la respuesta al preámbulo. En él se especifica el RIV (Resource Indication Value), el RB_start (primer Resource Block del grupo que contendrá el mensaje) y el L_CRB (número de RB contiguos). El RIV se calcula en la estación base con:

$$\begin{aligned}
 & \text{If } (L_{CRBs} - 1) \leq \left\lfloor \frac{N_{RB}^{UL}}{2} \right\rfloor: \\
 & RIV = N_{RB}^{UL}(L_{CRBs} - 1) + RB_{Start} \tag{10.1}
 \end{aligned}$$

Else:

$$RIV = N_{RB}^{UL}(N_{RB}^{UL} - L_{CRBs} + 1) + (N_{RB}^{UL} - 1 - RB_{Start})$$



La modulación y codificación del mensaje en el PUSCH MCS (Modulation Coding Scheme) que se indica en el UL grant viene recogida en la Tabla 10.1:

Tabla 10.1. MCS para PUSCH en función del valor CQI [61] .

CQI	Before Rel.12			Rel.12 and beyond		
	Modulation	Code rate	Bits per RE	Modulation	Code rate	Bits per RE
0	Out of range					
1	QPSK	0.0762	0.1524	QPSK	0.0762	0.1524
2	QPSK	0.1172	0.2344	QPSK	0.1885	0.377
3	QPSK	0.1885	0.377	QPSK	0.4385	0.877
4	QPSK	0.3008	0.6016	16QAM	0.3691	1.4764
5	QPSK	0.4385	0.877	16QAM	0.4785	1.914
6	QPSK	0.5879	1.1758	16QAM	0.6016	2.4064
7	16QAM	0.3691	1.4764	64QAM	0.4551	2.7306
8	16QAM	0.4785	1.914	64QAM	0.5537	3.3222
9	16QAM	0.6016	2.4064	64QAM	0.6504	3.9024
10	64QAM	0.4551	2.7306	64QAM	0.7539	4.5234
11	64QAM	0.5537	3.3222	64QAM	0.8525	5.115
12	64QAM	0.6504	3.9024	256QAM	0.6943	5.5544
13	64QAM	0.7539	4.5234	256QAM	0.7783	6.2264
14	64QAM	0.8525	5.115	256QAM	0.8634	6.9072
15	64QAM	0.9258	5.5548	256QAM	0.9258	7.4064

El usuario tendrá que esperar el tiempo indicado en el TAC recibido en el UL grant antes de poder enviar el mensaje.



```

▼ MAC-LTE UL-SCH: (SFN=999 , SF=2) UEId=0 (CCCH:6 bytes) (Padding:remainder)
  ▼ [Context (RNTI=48551)]
    [Radio Type: FDD (1)]
    [Direction: Uplink (0)]
    [System Frame Number: 999]
    [Subframe: 2]
    [RNTI: 48551]
    [RNTI Type: C-RNTI (3)]
    [Length of frame: 18]
    [Uplink grant size: 18]
    [Carrier Id: Primary (0)]
    [UL UE in TTI: 1]
  ▼ MAC PDU Header (CCCH:6) (Padding:remainder) [2 subheaders]
    ▼ Sub-header (lcid=CCCH, length=6)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...0 0000 = LCID: CCCH (0x00)
      0... .... = Format: Data length is < 128 bytes
      .000 0110 = Length: 6
    ▼ Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..0. .... = Extension: 0x0
      ...1 1111 = LCID: Padding (0x1f)
  ▼ LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    ▼ UL-CCCH-Message
      ▼ message: c1 (0)
        ▼ c1: rrcConnectionRequest (1)
          ▼ rrcConnectionRequest
            ▼ criticalExtensions: rrcConnectionRequest-r8 (0)
              ▼ rrcConnectionRequest-r8
                ▼ ue-Identity: randomValue (1)
                  randomValue: 407f7db725 [bit length 40, 0100 0000 0111 1111 0111 1101 1011 0111 0010 0101 decimal value 277016852261]
                  establishmentCause: mo-Signalling (3)
                  spare: 00 [bit length 1, 7 LSB pad bits, 0... .... decimal value 0]
                [CR response: 4098]
                Padding data: 00000000000000000000
                [Padding length: 9]

```

Figura 10.3 Paquete con mensaje RRC Connection Request.

10.2. RRC Connection Setup

El usuario será capaz de decodificar el mensaje RRC setup monitorizando un DCI con el C-RNTI notificado en la respuesta al preámbulo. Este mensaje contiene la configuración necesaria para que el UE genere los SRB1, estos son un tipo de Signalling Radio Bearer (SRB) (ver 4.6) que se utilizan en posteriores solicitudes Scheduling Request para el intercambio de mensajes RRC y NAS, una vez conectado a la celda. El mensaje RRC Setup también puede contener información para que el usuario configure los canales físicos [62].

Los SRB se utilizan para enviar mensajes RRC y NAS de control.

- RRC: Control entre UE y eNB en RRC.
- NAS: Control entre UE y MME (Mobile Manage Identity).

A continuación, se desglosa el paquete en Wireshark que contiene el mensaje RRC Connection Setup.



```

▼ MAC-LTE DL-SCH: (SFN=999 , SF=6) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:29 bytes) (Padding:remainder)
  ▼ [Context (RNTI=48551)]
    [Radio Type: FDD (1)]
    [Direction: Downlink (1)]
    [System Frame Number: 999]
    [Subframe: 6]
    [RNTI: 48551]
    [RNTI Type: C-RNTI (3)]
    [Length of frame: 41]
    [Carrier Id: Primary (0)]
    [DL UE in TTI: 1]
  > MAC PDU Header (UE Contention Resolution Identity) (CCCH:29) (Padding:remainder) [3 subheaders]
  > Contention Resolution (matches Msg3 from frame 4096, 0ms ago)
  ▼ LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
    ▼ DL-CCCH-Message
      ▼ message: c1 (0)
        ▼ c1: rrcConnectionSetup (3)
          ▼ rrcConnectionSetup
            rrc-TransactionIdentifier: 1
            ▼ criticalExtensions: c1 (0)
              ▼ c1: rrcConnectionSetup-r8 (0)
                ▼ rrcConnectionSetup-r8
                  ▼ radioResourceConfigDedicated
                    > srb-ToAddModList: 1 item
                    > mac-MainConfig: explicitValue (0)
                    > physicalConfigDedicated
          Padding data: 0000
          [Padding length: 2]

```



```

  ▾ srb-ToAddModList: 1 item
    ▾ Item 0
      ▾ SRB-ToAddMod
        srb-Identity: 1
        ▾ rlc-Config: explicitValue (0)
          ▾ explicitValue: am (0)
            ▾ am
              ▾ ul-AM-RLC
                t-PollRetransmit: ms80 (15)
                pollPDU: p4 (0)
                pollByte: kBinfinity (14)
                maxRetxThreshold: t4 (3)
              ▾ dl-AM-RLC
                t-Reordering: ms35 (7)
                t-StatusProhibit: ms0 (0)
            ▾ logicalChannelConfig: explicitValue (0)
              ▾ explicitValue
                ▾ ul-SpecificParameters
                  priority: 1
                  prioritisedBitRate: infinity (7)
                  bucketSizeDuration: ms50 (0)
                  logicalChannelGroup: 0
          ▾ mac-MainConfig: explicitValue (0)
            ▾ explicitValue
              ▾ ul-SCH-Config
                maxHARQ-Tx: n5 (4)
                periodicBSR-Timer: sf64 (6)
                retxBSR-Timer: sf320 (0)
                0... .... ttiBundling: False
                timeAlignmentTimerDedicated: infinity (7)
              ▾ phr-Config: setup (1)
                ▾ setup
                  periodicPHR-Timer: sf20 (1)
                  prohibitPHR-Timer: sf20 (2)
                  dl-PathlossChange: dB1 (0)
            ▾ physicalConfigDedicated
  
```



```

  ▾ physicalConfigDedicated
    ▾ pdsch-ConfigDedicated
      p-a: dB0 (4)
    ▾ pucch-ConfigDedicated
      ▾ ackNackRepetition: release (0)
        release: NULL
    ▾ pusch-ConfigDedicated
      betaOffset-ACK-Index: 0
      betaOffset-RI-Index: 0
      betaOffset-CQI-Index: 8
    ▾ uplinkPowerControlDedicated
      p0-UE-PUSCH: 0dB
      deltaMCS-Enabled: en1 (1)
      .... ...1 accumulationEnabled: True
      p0-UE-PUCCH: 0dB
      pSRS-Offset: 0
    ▾ tpc-PDCCH-ConfigPUCCH: setup (1)
      ▾ setup
        tpc-RNTI: 1234 [bit length 16, 0001 0010 0011 0100 decimal value 4660]
        > tpc-Index: indexOfFormat3 (0)
    ▾ tpc-PDCCH-ConfigPUSCH: setup (1)
      ▾ setup
        tpc-RNTI: 2234 [bit length 16, 0010 0010 0011 0100 decimal value 8756]
        ▾ tpc-Index: indexOfFormat3 (0)
          indexOfFormat3: 1
    ▾ cqi-ReportConfig
      cqi-ReportModeAperiodic: rm30 (3)
      nomPDSCH-RS-EPRE-Offset: 0dB (0)
      ▾ cqi-ReportPeriodic: release (0)
        release: NULL
    ▾ antennaInfo: explicitValue (0)
      ▾ explicitValue
        transmissionMode: tm1 (0)
        ▾ ue-TransmitAntennaSelection: release (0)
          release: NULL
    ▾ schedulingRequestConfig: setup (1)
      ▾ setup
        sr-PUCCH-ResourceIndex: 71
        ▾ sr-ConfigIndex: 5
          [Periodicity: 10]
          [Subframe Offset: 0]
        dsr-TransMax: n4 (0)

```

Figura 10.4 Paquete con mensaje RRC Connection Setup.



Descripción breve de los parámetros:

RRC Connection Setup

- **srb-ToAddModList**
 - **SRB-ToAddMod**
 - **Srb-Identity**: número de Signaling Radio Bearer a modificar (en Setup siempre es el SRB1 pero esta estructura se mantiene en mensajes de reconfiguración que pueden tener otros SRB).
 - **rlc-config**: (configuración RLC tiene 3 modos: TM, UM y AM)
 - **ul-AM-RLC**
 - **t-PollRetransmit**: temporizador para el transmisor de una entidad RLC AM que indica cuando retransmitir un poll (creo que es una petición de feedback pero no estoy seguro).
 - **pollPDU**: el bit de poll se inserta cuando el número de RLC PDU supera este valor.
 - **pollByte**: el bit de poll se inserta cuando los datos RLC superan este valor multiplicado por 1000.
 - **maxRetxThreshold**: número máximo de retransmisiones.
 - **dl-AM-RLC**
 - **t-Reordering**: temporizador para el receptor de una entidad RLC AM para detectar pérdidas de RLC PDUs en capas inferiores.
 - **t-StatusProhibit**: temporizador para el receptor de una entidad RLC AM para prohibir la transmisión de un PDU Status.
 - **mac-MainConfig**
 - **ul-SCH-Config**
 - **maxHARQ-Tx**: número máximo de transmisiones HARQ para reenvío.
 - **periodicBSR-Timer**: temporizador para enviar BSR periódico (mensaje UE -> eNB indicando el tamaño del buffer a transmitir).
 - **retxBSR-Timer**: temporizador para enviar BSR aperiódico (cuando entran datos al buffer avisa).
 - **ttiBundling**: indica si se utiliza el mecanismo TTI Bundling (permite enviar datos por el canal PUSCH en subtramas consecutivas a la especificada por el UL grant).
 - **timeAlignmentTimerDedicated**

Temporizador para corregir offsets entre la transmisión Downlink y Uplink debido al delay en la propagación por el canal radio.
 - **phr-Config**

Power Headroom Report, el usuario indica al eNB si puede o no transmitir más potencia.

 - **periodicPHR-Timer**: temporizador que indica al usuario cada cuanto enviar PHR.
 - **prohibitPHR-Timer**: temporizador para evitar transmisiones innecesarias.



- dl-PathlossChange: valor umbral, si la atenuación sobrepasa este valor (el UE la calcula con los pilotos) transmite PHR.
- **physicalConfigDedicated**
 - **pdsch-ConfigDedicated**
 - p-a: diferencia de potencia entre las subportadoras con datos del canal PDSCH y los pilotos de referencia.
 - **pucch-ConfigDedicated**
 - ackNackRepetition: similar a ttiBundling pero para HARQ en vez de datos.
 - **pusch-ConfigDedicated**
 - betaOffset-ACK-Index: MCS offset para los bits del HARQ.
 - betaOffset-RI-Index: MCS offset para los bits del RI.
 - betaOffset-CQI-Index: MCS offset para los bits del CQI y PMI.
 - **uplinkPowerControlDedicated**
 - p0-UE-PUSCH: sumando en la ecuación de potencia en PUSCH.
 - deltaMCS-Enabled: activa o desactiva variación de potencia para técnicas de codificación y modulación.
 - accumulation Enabled: dependiendo de si está activado o no la ecuación para el cálculo del feedback close loop varía.
 - P0-UE-PUCCH: sumando en la ecuación de potencia en PUCCH.
 - pSRS-Offset: offset de potencia para las Sounding Reference Signals.
 - **tpc-PDCCH-ConfigPUCCH**
 - tpc-RNTI: Transmit Power Control RNTI, para decodificar DCI formato 3 con información relativa al control de potencia en PUCCH.
 - tpc-Index: Un DCI formato 3 transporta varios campos similares, este índice indica al usuario cual de esos campos tiene que utilizar.
 - **tpc-PDCCH-ConfigPUSCH**
 - tpc-RNTI: Transmit Power Control RNTI, para decodificar DCI formato 3 con información relativa al control de potencia en PUSCH.
 - tpc-Index: Un DCI formato 3 transporta varios campos similares, este índice indica al usuario cual de esos campos tiene que utilizar.
 - **cqi-ReportConfig**
 - cqi-ReportModeAperiodic: indica si se permite el envío aperiódico de la calidad del canal.
 - nomPDSCH-RS-EPRE-Offset.
 - cqi-ReportPeriodic: indica el periodo en el cual el UE debe enviar el feedback de la calidad del canal.
 - **antennaInfo**
 - transmissionMode: modo de transmisión (ver 3.4.2).



- ue-TransmitAntennaSelection: indica que antena debe usar el usuario para la transmisión, se usa una máscara específica de antena que se aplica en el CRC del DCI junto con el RNTI (ver 6.1.6).
- **schedulingRequestConfig**
 - sr-PUCCH-ResourceIndex: especifica las subportadoras para enviar el Scheduling Request.
 - sr-ConfigIndex
 - [Periodicity] periodicidad para enviar Scheduling Request.
 - [Subframe offset] offset temporal para enviar Scheduling Request.
 - dsr-TransMax: número máximo de peticiones SR.

10.3. RRC Connection Setup Complete

El mensaje RRC Setup Complete indica al eNB que la conexión RRC ha sido establecida y que desea comenzar el establecimiento de la conexión NAS.

```

▼ MAC-LTE UL-SCH: (SFN=973 , SF=8) UEId=0 (Long BSR) (1:4 bytes) (Padding:remainder)
  ▼ [Context (RNTI=48551)]
    [Radio Type: FDD (1)]
    [Direction: Uplink (0)]
    [System Frame Number: 973]
    [Subframe: 8]
    [RNTI: 48551]
    [RNTI Type: C-RNTI (3)]
    [Length of frame: 22]
    [Uplink grant size: 22]
    [Carrier Id: Primary (0)]
    [UL UE in TTI: 1]
  ▼ MAC PDU Header (Long BSR) (1:4) (Padding:remainder) [3 subheaders]
    ▼ Sub-header (lcid=Long BSR)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...1 1110 = LCID: Long BSR (0x1e)
    ▼ Sub-header (lcid=1, length=4)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...0 0001 = LCID: 1 (0x01)
      0... .... = Format: Data length is < 128 bytes
      .000 0100 = Length: 4
    ▼ Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..0. .... = Extension: 0x0
      ...1 1111 = LCID: Padding (0x1f)
  ▼ Long BSR 0:(BS = 0) 1:(BS = 0) 2:(BS = 0) 3:(BS = 0)
    0000 00.. = Buffer Size 0: BS = 0 (0)
    .... ..00 0000 .... = Buffer Size 1: BS = 0 (0)
    ... 0000 00.. .... = Buffer Size 2: BS = 0 (0)
    ..00 0000 = Buffer Size 3: BS = 0 (0)
  > RLC-LTE [UL] [AM] SRB:1 [DATA] (P) sn=1 ..2-bytes
    Padding data: 5df5e8a6aaf6751fd92aec
    [Padding length: 11]
  
```



```

    RLC-LTE [UL] [AM] SRB:1 [DATA] (P) sn=1 ..2-bytes
    [Context]
      [Direction: Uplink (0)]
      [RLC Mode: Acknowledged Mode (4)]
      [Channel Type: SRB (4)]
      [Channel ID: 1]
      [PDU Length: 4]
      [AM Sequence number length: 10]
    AM Header (P) sn=1
      1... .. = Frame type: Data PDU (0x1)
      .0.. .. = Re-segmentation Flag: AMD PDU (0x0)
      ..1. .... = Polling Bit: Status report is requested (0x1)
      ...1 0... = Framing Info: First byte does not begin a RLC SDU and last byte ends a RLC SDU (0x2)
      .... .0.. = Extension: Data field follows from the octet following the fixed part of the header (0x0)
      .... ..00 0000 0001 = Sequence Number: 1
    [Sequence Analysis - OK]
      [Previous frame for channel: 4592]
      [OK: True]
      [Next frame for channel: 4620]
    [Reassembly Source: 2 segments, 58 bytes (SN=0 frame=4592 len=56) (SN=1 frame=4598 len=2)]
      [Number of segments: 2]
      [Total length: 58]
    [Segment (SN=0 frame=4592 length=56)]
      [SN: 0]
      [Frame: 4592]
      [Length: 56]
    [Segment (SN=1 frame=4598 length=2)]
      [SN: 1]
      [Frame: 4598]
      [Length: 2]
    PDCP-LTE sn=0
    [Configuration: (direction=Uplink, plane=Signalling)]
      [Direction: Uplink (0)]
      [Plane: Signalling (1)]
      [Channel type: DCCH (1)]
      [Channel Id: 1]
      [ROHC Compression: False]
      000. .... = Reserved: 0
      ...0 0000 = Seq Num: 0
    [Sequence Analysis - OK]
      [OK: True]
    LTE Radio Resource Control (RRC) protocol
      > UL-DCCH-Message
      MAC: 0x00000000 [Matches calculated result]
    Padding data: 5df5e8a6aaf6751fd92aec
    [Padding length: 11]
  
```

Figura 10.5 Paquete con mensaje RRC Connection Setup Complete.

Descripción breve de los parámetros:

RRC Connection Setup Complete

- **selectedPLMN-Identity**
Indica el PLMN (Public Land Mobile Network) a registrar en la red, es un campo obligatorio, el MCC (Mobile Country Code) junto con el MNC (Mobile Network Code) conforman el PLMN.
- **dedicatedInfoNAS**



○ **Non-Access-Stratum (NAS)PDU**

- Cabeceras NAS: descripción en el propio paquete wireshark.
- EPS mobile identity
 - IMSI: Identidad única para cada celular a nivel mundial
 - MCC: tupla que identifica el país del operador de telefonía.
 - MNC: tupla que identifica el operador de telefonía.

▪ UE network capability:

Indica a la red que soporta y que no soporta el usuario a nivel de encriptación, EEA (EPS Encryption Algorithm) y EIA (EPS Integrity Algorithm).

▪ ESM message container:

La misión del ESM (EPS Session Management) es la de permitir transmisiones piggyback (no se envía HARQ nada más recibir el mensaje si no que se espera a la próxima transmisión de datos para enviarlo todo junto) de mensajes ESM dentro de mensajes EMM (EPS Mobility Management), los parámetros a enviar en este mensaje varían y su objetivo es iniciar la conexión NAS entre el usuario y el MME.



11

Estructura MAC PDU

La cabecera MAC y la estructura PDU para los datos de usuario varían con la vista en el apartado 9.2 en la respuesta al preámbulo ya que este es un caso particular de un mensaje muy concreto. Para la transmisión de datos usuario existen 6 posibles subcabeceras:

- R: reservado para uso futuro, está fijada a valor 0.
- E: de extensión, es la única subcabecera que comparte con la respuesta al preámbulo.
 - Su valor a cero indica que no hay más campos después de este.
 - Su valor a uno indica que al menos hay un campo después.
- LCID: de Logical Channel ID, índice que indica el número de canal lógico.

Tabla 11.1. LCID en DL-SCH.

Índice	LCID
00000	CCCH
00001-01010	Identity of the logical channel
01011-10111	Reserved
11000	Activation/Deactivation
11001	SC-MCCH, SC-MTCH
11010	Long DRX Command
11011	Activation/Deactivation
11100	UE Contention Resolution Identity
11101	Timing Advance Command
11110	DRX Command
11111	Padding

Tabla 11.2. LCID en UL-SCH.

Índice	LCID
00000	CCCH
00001-01010	Identity of the logical channel
01011	CCCH
01100-10101	Reserved
10110	Truncated Sidelink BSR
10111	Sidelink BSR
11000	Dual Connectivity Power Headroom Report
11001	Extended Power Headroom Report
11010	Power Headroom Report
11011	C-RNTI
11100	Truncated BSR
11101	Short BSR
11110	Long BSR
11111	Padding



- F: de formato, especifica la longitud del campo L.
 - Su valor cero indica que la longitud de L es de 7 bits.
 - Su valor uno indica que la longitud de L es de 15 bits.
- F2: de formato 2, es un nuevo campo definido en la versión 13 del estándar.
 - Su valor cero indica que la longitud de L la especifica el campo F.
 - Su valor uno indica que la longitud de L es de 16 bits.
- L: de longitud, especifica la longitud del MAC SDU (Service Data Unit), si este campo no existe se asume que la longitud del MAC PDU es de un TBS (Transport Block Size).

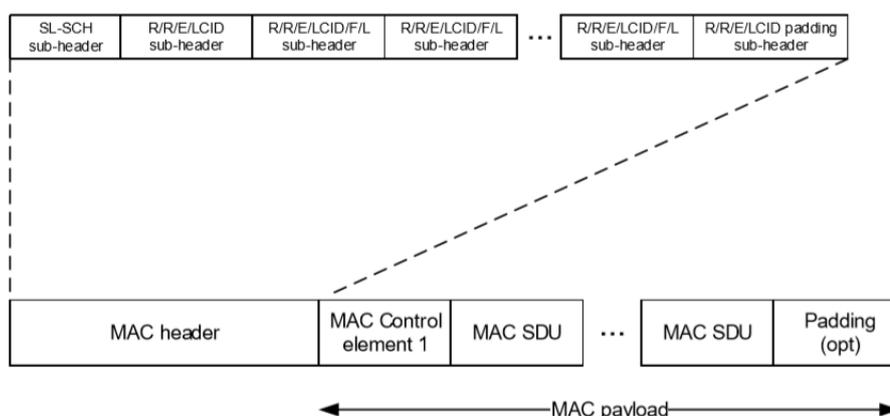


Figura 11.1 Paquete con mensaje RRC Connection Setup [49].

Existen cuatro posibles estructuras para las cabeceras en MAC:

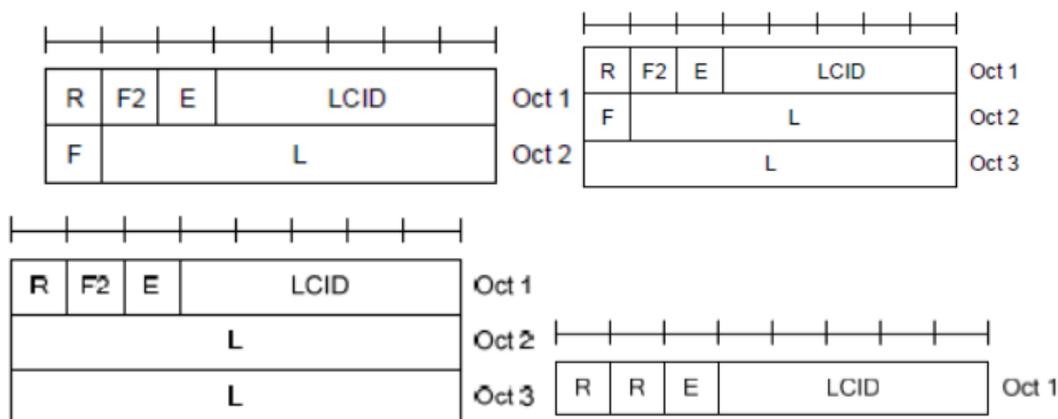


Figura 11.2 Estructuras para cabeceras MAC [49].

En la Figura 11.3 se muestra un ejemplo real (de la misma comunicación utilizada para los ejemplos anteriores empleando el OAI) de un ping a una dirección IP. Los paquetes en el



Wireshark ya contienen las cabeceras MAC identificadas, así como el contenido del mensaje SDU.

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
5911	19.111874846	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=264, SF=6) UEId=0 (Long BSR) (3:976 bytes) (Padding:remainder)
5914	19.111972195	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=2)
5917	19.113382077	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	144 UL-SCH: (SFN=264, SF=7) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
5920	19.114822538	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94 SystemInformation [SIB2 SIB3]
5923	19.117981270	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=2)
5926	19.118498204	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	122 UL-SCH: (SFN=265, SF=8) UEId=0 (Short BSR) (3:remainder)
5929	19.119713348	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
5932	19.121531432	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1154 DL-SCH: (SFN=266, SF=7) UEId=0 (3:1032 bytes) (Padding:remainder)
5935	19.123195920	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=266, SF=6) UEId=0 (Long BSR) (3:974 bytes) (Padding:remainder)
5938	19.124890962	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=2)
5941	19.125460981	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	144 UL-SCH: (SFN=266, SF=7) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
5944	19.148101032	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1154 DL-SCH: (SFN=267, SF=9) UEId=0 (3:1032 bytes) (Padding:remainder)
5947	19.149857364	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=3)
5950	19.151175208	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
5953	19.158207081	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=3)
5956	19.159344661	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	122 UL-SCH: (SFN=268, SF=8) UEId=0 (Short BSR) (3:remainder)
5959	19.164319303	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=269, SF=6) UEId=0 (3:remainder)
5962	19.164376858	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=3)
5965	19.165479048	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=269, SF=7) UEId=0 (3:remainder)
5968	19.166563915	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=269, SF=8) UEId=0 (Long BSR) (3:918 bytes) (Padding:remainder)
5971	19.166933866	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	328 UL-SCH: (SFN=269, SF=9) UEId=0 (Power Headroom Report) (Long BSR) (Padding:remainder)
5974	19.167662900	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
5977	19.171364819	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1631 DL-SCH: (SFN=271, SF=0) UEId=0 (Padding) (Padding) (3:remainder)
5980	19.171429078	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=3)
5983	19.171987403	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	608 DL-SCH: (SFN=271, SF=1) UEId=0 (3:497 bytes) (Padding:remainder)
5986	19.173325052	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1154 DL-SCH: (SFN=271, SF=4) UEId=0 (3:1032 bytes) (Padding:remainder)
5989	19.197382434	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=4)
5992	19.198526119	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	122 UL-SCH: (SFN=271, SF=8) UEId=0 (Short BSR) (3:remainder)
5995	19.199385889	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	73 SystemInformationBlockType1
5998	19.203630444	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=272, SF=6) UEId=0 (3:remainder)
6001	19.203751832	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=4)
6004	19.205257089	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	1122 UL-SCH: (SFN=272, SF=7) UEId=0 (3:remainder)
6007	19.205318805	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	81 UL-SCH: (SFN=272, SF=8) UEId=0 (3:remainder)
6010	19.205926605	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	94 SystemInformation [SIB2 SIB3]
6013	19.209155258	127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	59 MasterInformationBlock (SFN=4)
6016	19.210268480	127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	2255 DL-SCH: (SFN=274, SF=1) UEId=0 (3:2064 bytes) (Padding:remainder)

Figura 11.3 Captura de paquetes LTE en Wireshark mostrando intercambio de datos usuario (ping).



11.1. Ping UE -> eNB

```

v MAC-LTE UL-SCH: (SFN=264 , SF=6) UEId=0 (Long BSR) (3:976 bytes) (Padding:remainder)
  v [Context (RNTI=48551)]
    [Radio Type: FDD (1)]
    [Direction: Uplink (0)]
    [System Frame Number: 264]
    [Subframe: 6]
    [RNTI: 48551]
    [RNTI Type: C-RNTI (3)]
    [Length of frame: 1063]
    [Uplink grant size: 1063]
    [Carrier Id: Primary (0)]
    [UL UE in TTI: 1]
  v MAC PDU Header (Long BSR) (3:976) (Padding:remainder) [3 subheaders]
    v Sub-header (lcid=Long BSR)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...1 1110 = LCID: Long BSR (0x1e)
    v Sub-header (lcid=3, length=976)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...0 0011 = LCID: 3 (0x03)
      1... .... = Format: Data length is >= 128 bytes
      .000 0011 1101 0000 = Length: 976
    v Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..0. .... = Extension: 0x0
      ...1 1111 = LCID: Padding (0x1f)
  v Long BSR  0:(BS = 0) 1:(BS = 0) 2:(BS = 0) 3:(BS = 0)
    0000 00.. = Buffer Size 0: BS = 0 (0)
    .... ..00 0000 .... = Buffer Size 1: BS = 0 (0)
    .... 0000 00.. .... = Buffer Size 2: BS = 0 (0)
    ..00 0000 = Buffer Size 3: BS = 0 (0)
  SDU (3, length=976 bytes): 10041a1b1c1d1e1f202122232425262728292a2b2c2d2e2f.....
  Padding data: 88e341a8265381a666b7a6451deac25404dbad73f6105a9a...
  [Padding length: 79]
  
```

Figura 11.4 Paquete con long BSR, datos usuario y padding.

En este paquete primero se envía un MAC CE (Control Element) con un LCID índice 11110 lo que indica un long BSR (Buffer Status Report), existen dos tipos de BSR:

- Short BSR, con este campo el UE puede informar a la estación base de la cantidad de datos almacenados en el buffer usuario sólo para un canal lógico específico, indicado en el campo LCG ID.

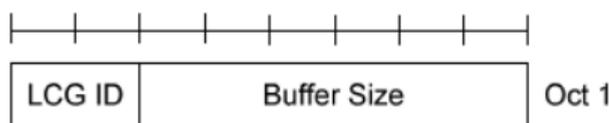


Figura 11.[60] Estructura para short BSR [63].

- Long BSR, mediante este campo el UE es capaz de informar la cantidad de datos almacenados en el buffer usuario para todos los canales lógicos.

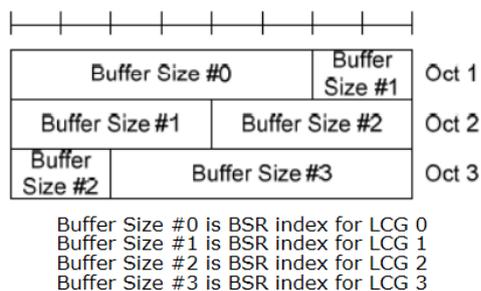


Figura 11.5 Estructura para long BSR [63].

El tamaño del campo “Buffer Size” es siempre de 6 bits por lo que hay 64 posibles valores, cada uno de estos valores indica un rango en bytes para el tamaño de buffer en el usuario (Tabla 11.3):

Tabla 11.3. Tamaños del buffer usuario.

“Buffer Size”	Tamaño del Buffer (bytes)	“Buffer Size”	Tamaño del Buffer (bytes)
0	Buffer = 0	32	1132 < Buffer <= 1326
1	0 < Buffer <= 10	33	1326 < Buffer <= 1552
2	10 < Buffer <= 12	34	1552 < Buffer <= 1817
3	12 < Buffer <= 14	35	1817 < Buffer <= 2127
4	14 < Buffer <= 17	36	2127 < Buffer <= 2490
5	17 < Buffer <= 19	37	2490 < Buffer <= 2915
6	19 < Buffer <= 22	38	2915 < Buffer <= 3413
7	22 < Buffer <= 26	39	3413 < Buffer <= 3995
8	26 < Buffer <= 31	40	3995 < Buffer <= 4677
9	31 < Buffer <= 36	41	4677 < Buffer <= 5476
10	36 < Buffer <= 42	42	5476 < Buffer <= 6411
11	42 < Buffer <= 49	43	6411 < Buffer <= 7505
12	49 < Buffer <= 57	44	7505 < Buffer <= 8787
13	57 < Buffer <= 67	45	8787 < Buffer <= 10287
14	67 < Buffer <= 78	46	10287 < Buffer <= 12043
15	78 < Buffer <= 91	47	12043 < Buffer <= 14099
16	91 < Buffer <= 107	48	14099 < Buffer <= 16507
17	107 < Buffer <= 125	49	16507 < Buffer <= 19325
18	125 < Buffer <= 146	50	19325 < Buffer <= 22624
19	146 < Buffer <= 171	51	22624 < Buffer <= 26487
20	171 < Buffer <= 200	52	26487 < Buffer <= 31009
21	200 < Buffer <= 234	53	31009 < Buffer <= 36304
22	234 < Buffer <= 274	54	36304 < Buffer <= 42505
23	274 < Buffer <= 321	55	42505 < Buffer <= 49759
24	321 < Buffer <= 376	56	49759 < Buffer <= 58255
25	376 < Buffer <= 440	57	58255 < Buffer <= 68201
26	440 < Buffer <= 515	58	68201 < Buffer <= 79846
27	515 < Buffer <= 603	59	79846 < Buffer <= 93479
28	603 < Buffer <= 706	60	93479 < Buffer <= 109439
29	706 < Buffer <= 826	61	109439 < Buffer <= 128125
30	826 < Buffer <= 967	62	128125 < Buffer <= 150000
31	967 < Buffer <= 1132	63	Buffer > 150000



El mensaje MAC en código hexadecimal es el siguiente:

```

3e 23 83 d0 1f 00 00 00 10 04 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32 33
34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54 55 56 57
58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 6a 6b 6c 6d 6e 6f 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 7a 7b
7c 7d 7e 7f 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 8a 8b 8c 8d 8e 8f 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 9a 9b 9c 9d 9e 9f
a0 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 aa ab ac ad ae af b0 b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 ba bb bc bd be bf c0 c1 c2 c3
c4 c5 c6 c7 c8 c9 ca cb cc cd ce cf d0 d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 da db dc dd de df e0 e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7
e8 e9 ea eb ec ed ee ef f0 f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 fa fb fc fd fe ff 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0a 0b 0c 0d 0e
0f 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32
33 34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54 55 56
57 58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 6a 6b 6c 6d 6e 6f 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 7a
7b 7c 7d 7e 7f 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 8a 8b 8c 8d 8e 8f 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 9a 9b 9c 9d 9e
9f a0 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 aa ab ac ad ae af b0 b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 ba bb bc bd be bf c0 c1 c2
c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 ca cb cc cd ce cf d0 d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 da db dc dd de df e0 e1 e2 e3 e4 e5 e6
e7 e8 e9 ea eb ec ed ee ef f0 f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 fa fb fc fd fe ff 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0a 0b 0c 0d
0e 0f 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31
32 33 34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54 55
56 57 58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 6a 6b 6c 6d 6e 6f 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79
7a 7b 7c 7d 7e 7f 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 8a 8b 8c 8d 8e 8f 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 9a 9b 9c 9d
9e 9f a0 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 aa ab ac ad ae af b0 b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 ba bb bc bd be bf c0 c1
c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 ca cb cc cd ce cf d0 d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 da db dc dd de df e0 e1 e2 e3 e4 e5
e6 e7 e8 e9 ea eb ec ed ee ef f0 f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 fa fb fc fd fe ff 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0a 0b 0c
0d 0e 0f 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54
55 56 57 58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 6a 6b 6c 6d 6e 6f 70 71 72 73 74 75 76 77 78
79 7a 7b 7c 7d 7e 7f 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 8a 8b 8c 8d 8e 8f 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 9a 9b 9c
9d 9e 9f a0 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 aa ab ac ad ae af b0 b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 ba bb bc bd be bf c0
c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 ca cb cc cd ce cf d0 d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 da db dc dd de df e0 e1 e2 e3 e4
e5 e6 e7 88 e3 41 a8 26 53 81 a6 66 b7 a6 45 1d ea c2 54 04 db ad 73 f6 10 5a 9a df 6c 0f 8f 91 4d 0e 3b 4e
f2 d2 50 97 84 11 e8 87 52 f5 89 bb 25 db ad 62 ef b1 e3 d6 e4 04 72 35 c9 bf c0 70 2f 42 31 7e 41 3c 0d b3
38 a8 25 eb f3 b8 93 86 84 43

```

- Cabeceras, los cinco octetos en color verde:
 - 3e (0011 1110):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de reservado (R).
 - 1, bit de extensión (E) indicando que hay más subcabeceras.
 - 11110, secuencia LCID para long BSR.
 - 23 83 d0 (0010 0011 1000 0011 1101 0000):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de formato 2 (F2) indicando que la longitud del campo L se especifica en F.
 - 1, bit de extensión (E) indicando que hay más subcabeceras.
 - 00011, secuencia LCID para canal lógico número 3.
 - 1, bit de formato (F) indicando que la longitud del campo L será de 15 bits.
 - 000001111010000, secuencia L indicando que la longitud del MAC SDU será de 976 bytes.
 - 1f (0001 1111):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de formato 2 (F2) indicando que la longitud del campo L se especifica en F.



- 0, bit de extensión (E) indicando que no hay más subcabeceras.
- 11111, secuencia LCID para Padding (secuencia aleatoria hasta llenar el paquete).
- Long BSR, los tres octetos en azul:
 - 000000, primer buffer vacío.
 - 000000, segundo buffer vacío.
 - 000000, tercer buffer vacío.
 - 000000, cuarto buffer vacío.
- SDU, la secuencia en naranja:
 - Paquete de datos MAC.
- Padding, la secuencia en gris:
 - Cadena aleatoria de bits para rellenar.

A continuación, se muestra un diagrama enlazando las capas de LTE para el transporte de paquetes de datos entre el usuario y la estación base.

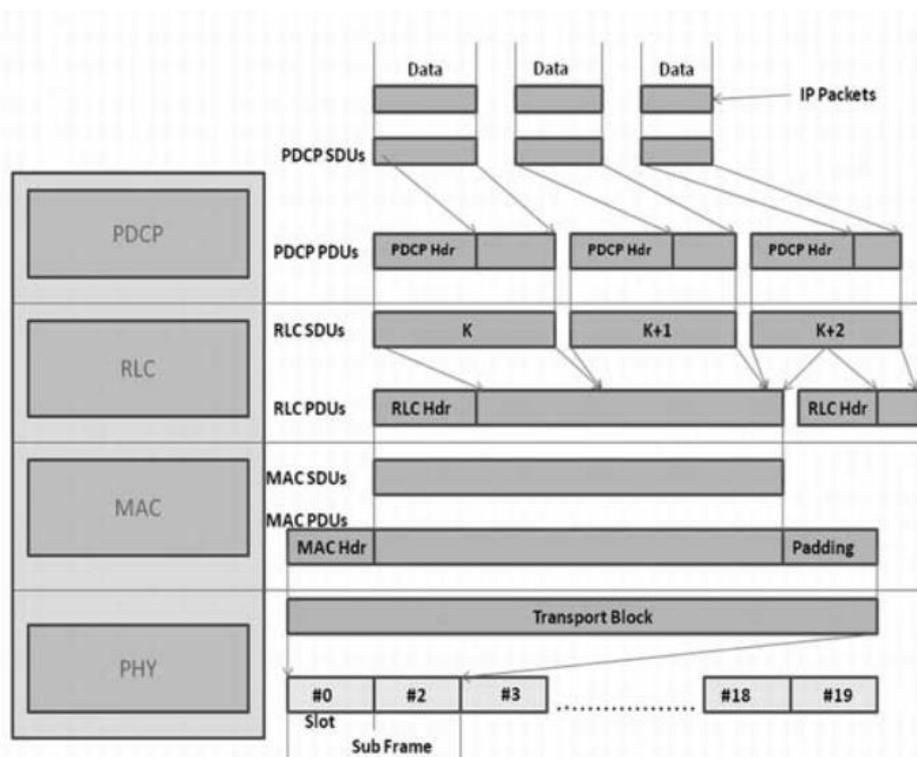


Figura 11.6 Diagrama con cabeceras de datos en cada capa LTE [64].



11.2. Transmisión periódica de BSR

```

▼ MAC-LTE UL-SCH: (SFN=264 , SF=7) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
  > [Context (RNTI=48551)]
  ▼ MAC PDU Header (Long BSR) (Padding:remainder) [2 subheaders]
    ▼ Sub-header (lcid=Long BSR)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...1 1110 = LCID: Long BSR (0x1e)
    ▼ Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..0. .... = Extension: 0x0
      ...1 1111 = LCID: Padding (0x1f)
  ▼ Long BSR 0:(BS = 0) 1:(BS = 0) 2:(BS = 0) 3:(BS = 0)
    0000 00.. = Buffer Size 0: BS = 0 (0)
    .... ..00 0000 .... = Buffer Size 1: BS = 0 (0)
    .... 0000 00.. .... = Buffer Size 2: BS = 0 (0)
    ..00 0000 = Buffer Size 3: BS = 0 (0)
    Padding data: b605eba986928f44295698ec9f734a936f3d802a60b8139c...
    [Padding length: 80]
  
```

Figura 11.7 Paquete con long BSR, datos usuario y padding

En esta ocasión el usuario le envía al eNB un paquete con un Long BSR así como el Padding restante para rellenar el TBS, esta transmisión es periódica y su periodicidad se especifica en los mensajes RRC Connection Setup o RRC Connection Reconfiguration (ver parámetro periodicBSR-Timer en 6.9.8).

El mensaje MAC en código hexadecimal es el siguiente:

```

3e 1f 00 00 00 b6 05 eb a9 86 92 8f 44 29 56 98 ec 9f 73 4a 93 6f 3d 80 2a 60 b8 13 9c 75 47 9a 0a 30 34 7c
c5 ac 96 f5 50 8d 30 03 79 d7 2b 96 f1 02 bb d8 d3 5c 57 a0 c0 d6 f7 5f 69 5a fa 46 34 38 a9 3e ae 55 8b 1a
14 46 53 f9 33 56 35 19 4c e7 3e d4 c6
  
```

- Cabeceras, los cuatro octetos en color verde:
 - 3e (0011 1110):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de reservado (R).
 - 1, bit de extensión (E) indicando que hay más subcabeceras.
 - 11110, secuencia LCID para long BSR.
 - 1f (0001 1111):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de formato 2 (F2) indicando que la longitud del campo L se especifica en F.
 - 0, bit de extensión (E) indicando que no hay más subcabeceras.
 - 11111, secuencia LCID para Padding (secuencia aleatoria hasta llenar el paquete).
- Long BSR, los tres octetos en azul:
 - 000000, primer buffer vacío.



- 000000, segundo buffer vacío.
- 000000, tercer buffer vacío.
- 000000, cuarto buffer vacío.
- Padding, la secuencia en gris:
 - Cadena aleatoria de bits para rellenar.

11.3. Respuesta eNB -> UE

```

v MAC-LTE DL-SCH: (SFN=266 , SF=7) UEId=0 (3:1032 bytes) (Padding:remainder)
  v [Context (RNTI=48551)]
    [Radio Type: FDD (1)]
    [Direction: Downlink (1)]
    [System Frame Number: 266]
    [Subframe: 7]
    [RNTI: 48551]
    [RNTI Type: C-RNTI (3)]
    [Length of frame: 1095]
    [Carrier Id: Primary (0)]
    [DL UE in TTI: 1]
  v MAC PDU Header (3:1032) (Padding:remainder) [2 subheaders]
    v Sub-header (lcid=3, length=1032)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...0 0011 = LCID: 3 (0x03)
      1... .... = Format: Data length is >= 128 bytes
      .000 0100 0000 1000 = Length: 1032
    v Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..0. .... = Extension: 0x0
      ...1 1111 = LCID: Padding (0x1f)
    SDU (3, length=1032 bytes): 000080004500040450f700003f015856c0a801010c01010200005e4313f20001
    Padding data: 000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000...
    [Padding length: 59]
  
```

Figura 11.8 Paquete con datos usuario y padding.

El mensaje MAC en código hexadecimal es el siguiente:

```

23 84 08 1f 00 00 80 00 45 00 04 04 50 f7 00 00 3f 01 58 56 c0 a8 01 01 0c 01 01 02 00 00 5e 43 13 f2 00 01
47 68 be 5e 00 00 00 00 27 bf 07 00 00 00 00 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23
24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44 45 46 47
48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 6a 6b
6c 6d 6e 6f 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 7a 7b 7c 7d 7e 7f 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 8a 8b 8c 8d 8e 8f
90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 9a 9b 9c 9d 9e 9f a0 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 aa ab ac ad ae af b0 b1 b2 b3
b4 b5 b6 b7 b8 b9 ba bb bc bd be bf c0 c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 ca cb cc cd ce cf d0 d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7
d8 d9 da db dc dd de df e0 e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8 e9 ea eb ec ed ee ef f0 f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 fa fb fc fd fe
ff 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0a 0b 0c 0d 0e 0f 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22
23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44 45 46
47 48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 6a
6b 6c 6d 6e 6f 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 7a 7b 7c 7d 7e 7f 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 8a 8b 8c 8d 8e
8f 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 9a 9b 9c 9d 9e 9f a0 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 aa ab ac ad ae af b0 b1 b2
b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 ba bb bc bd be bf c0 c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 ca cb cc cd ce cf d0 d1 d2 d3 d4 d5 d6
d7 d8 d9 da db dc dd de df e0 e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8 e9 ea eb ec ed ee ef f0 f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 fa fb fc
fd fe ff 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0a 0b 0c 0d 0e 0f 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 3a 3b 3c 3d 3e 3f 40 41 42 43 44
45 46 47 48 49 4a 4b 4c 4d 4e 4f 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5a 5b 5c 5d 5e 5f 60 61 62 63 64 65 66 67 68
  
```




11.4. Transmisión periódica de PHR

```

▼ MAC-LTE UL-SCH: (SFN=269 , SF=9) UEId=0 (Power Headroom Report) (Long BSR) (Padding:remainder)
  ▼ [Context (RNTI=48551)]
    [Radio Type: FDD (1)]
    [Direction: Uplink (0)]
    [System Frame Number: 269]
    [Subframe: 9]
    [RNTI: 48551]
    [RNTI Type: C-RNTI (3)]
    [Length of frame: 269]
    [Uplink grant size: 269]
    [Carrier Id: Primary (0)]
    [UL UE in TTI: 1]
  ▼ MAC PDU Header (Power Headroom Report) (Long BSR) (Padding:remainder) [3 subheaders]
    ▼ Sub-header (lcid=Power Headroom Report)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...1 1010 = LCID: Power Headroom Report (0x1a)
    ▼ Sub-header (lcid=Long BSR)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..1. .... = Extension: 0x1
      ...1 1110 = LCID: Long BSR (0x1e)
    ▼ Sub-header (lcid=Padding, length is remainder)
      0... .... = SCH reserved bit: 0x0
      .0.. .... = Format2: Data length is < 32768 bytes
      ..0. .... = Extension: 0x0
      ...1 1111 = LCID: Padding (0x1f)
  ▼ Power Headroom Report (PH >= 40)
    00.. .... = Reserved: 0
    ..11 1111 = Power Headroom Level: PH >= 40 (63)
  ▼ Long BSR 0:(BS = 0) 1:(BS = 0) 2:(BS = 0) 3:(BS = 0)
    0000 00.. = Buffer Size 0: BS = 0 (0)
    .... ..00 0000 .... = Buffer Size 1: BS = 0 (0)
    .... 0000 00.. .... = Buffer Size 2: BS = 0 (0)
    ..00 0000 = Buffer Size 3: BS = 0 (0)
    Padding data: b7b28a095acdcdcfcee93cbdaa4ef19131f63987ccfb1c65...
    [Padding length: 262]
  
```

Figura 11.9 Paquete con PHR, long BSR y padding.

En este mensaje junto con otra transmisión periódica de BSR el usuario envía también un PHR (Power Headroom Report) periódico, indicando la cantidad de potencia disponible para la comunicación que no está usando actualmente. El campo PH de la subcabecera PHR indica la relación entre el nivel de potencia disponible y el usado.

Tabla 11.4. Ratio de potencia en función de PH.

PH	Ratio de potencia (dB)
0	$-23 \leq PH < -22$
1	$-22 \leq PH < -21$
2	$-21 \leq PH < -20$
3	$-20 \leq PH < -19$
...	...
60	$37 \leq PH < 38$
61	$38 \leq PH < 39$
62	$39 \leq PH < 40$
63	$PH \geq 40$



La periodicidad de este paquete también se encuentra definida en los mensajes RRC Connection Setup o RRC Reconfiguration (ver campo phr-Config en 6.9.8).

El mensaje MAC en código hexadecimal es el siguiente:

```
3a 3e 1f 3f 00 00 00 b7 b2 8a 09 5a cd ed cf ce e9 3c bd aa 4e f1 91 31 f6 39 87 cc fb 1c 65 c1 b0 34 58 62 b4
17 25 d5 ec 46 b1 e8 e5 96 c1 72 7d 47 b6 a9 62 91 d2 1d 92 3f 6e d5 7d 20 5a dc cc 8c cd 9e 04 55 3e 8c f2
bd 64 30 98 2a d9 48 77 bc 63 31 54 96 d5 85 38 b8 42 60 d3 67 07 d4 e3 a5 1f cd c2 02 43 0c 68 8b a1 bb 3f
40 b6 b3 cd 1e d1 04 a6 82 49 64 43 8e 4a 89 51 d2 42 85 b2 b8 3e b6 3d f6 bb 39 7c ee 52 93 5c 4f dd 59 c3
f5 a4 6c ee 78 15 1e 31 d6 43 10 6d bb c8 3a 0d 15 48 ee 16 74 0d 4b 23 0b 3d 41 36 a7 e7 e5 d1 be 28 a6
d0 ae 09 30 61 5b 39 a6 cd eb 4e d1 3d 0d 11 c1 34 35 a0 42 3b 31 f1 84 82 9b 29 f2 be 8b 16 a3 51 bb f8 6c
6b 05 79 24 69 f2 19 12 34 d6 f5 42 08 5e ba 66 24 97 6e be 2e a2 aa 15 6c 46 fc af 25 b2 04 30 0f 17 e8 37
ab 3a b6 5c d6 0c ae 27 7a 26 b8 17 4a 9c 9c eb ab
```

- Cabeceras, los cuatro octetos en color verde:
 - 3a (0011 1010):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de reservado (R).
 - 1, bit de extensión (E) indicando que hay más subcabeceras.
 - 11010, secuencia LCID para Power Headroom Report.
 - 3e (0011 1110):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de reservado (R).
 - 1, bit de extensión (E) indicando que hay más subcabeceras.
 - 11110, secuencia LCID para long BSR.
 - 1f (0001 1111):
 - 0, bit de reservado (R).
 - 0, bit de formato 2 (F2) indicando que la longitud del campo L se especifica en F.
 - 0, bit de extensión (E) indicando que no hay más subcabeceras.
 - 11111, secuencia LCID para Padding (secuencia aleatoria hasta llenar el paquete).
- Power Headroom Report, el octeto en color rojo:
 - 00, dos bits reservados.
 - 111111, nivel 63 por lo que $PH \geq 40$.
- Long BSR, los tres octetos en azul:
 - 000000, primer buffer vacío.
 - 000000, segundo buffer vacío.
 - 000000, tercer buffer vacío.
 - 000000, cuarto buffer vacío.
- Padding, la secuencia en gris:
 - Cadena aleatoria de bits para rellenar.



12

Comunicación Post Attaching

12.1. Channel State Information

La información de estado del canal se descompone en tres tipos de indicadores [65]:

- Precoding Matrix Indicator (PMI).
- Channel Quality Indicator (CQI).
- Rank Indicator (RI).

12.1.1. Precoding Matrix Indicator

Una de las tareas más importantes que recae en el CSI es la de estimar la calidad del canal y recomendar una Precoding Matrix, por lo que gran parte de la estimación e informe del CSI está estrechamente relacionada con varias Precoding Matrix. Hay varios conjuntos diferentes de Precoding Matrix y diferentes tipos Precoding Matrix (Codebook) los cuales se utilizan para diferentes condiciones de transmisión (más específicamente, diferentes modos de transmisión).

Por lo tanto, para comprender el mecanismo general de estimación/informe del CSI, el primer paso sería familiarizarse con todos estos conjuntos de matrices de precodificación y cómo representar cada matriz específica del conjunto seleccionado.

Debido a que existen muchos conjuntos de matrices diferentes en LTE se asigna un índice a cada una de las Precoding Matrix y la información a enviar entre el UE y la red es dicho índice.

Tabla 12.1. Número de bits para PMI codebooks en función de los modos de transmisión.

Modo de transmisión	Nº de bits		
	2 puertos de antena	4 puertos de antena	8 puertos de antena
3	2	4	-
4	6	64	-
5	4	16	-
6	4	16	-
8	6	32	-
9 y 10	6	64	109



La siguiente tabla 12.2 indica el número de Precoding Matrix que soporta dicha configuración así como el número de bits del índice asociado, se muestra a continuación un ejemplo para los números más pequeños:

Tabla 12.2. Número e índice de Precoding Matrix en función del número de bits.

Nº de bits	Nº de Precoding Matrix	Índices
2	2	01
		10
4	4	0001
		0010
		0100
		1000
6	6	000001
		000010
		000100
		001000
		010000
		100000

Esta tabla por tanto sólo especifica el número de Precoding Matrix así como los índices asociados para cada una pero no el contenido (Codebook), para ello se emplea otro tipo de tabla definida en 36.211 apartado 6.3.4. Por facilitar la lectura sólo se incluye un ejemplo para el caso de Nº de bits = 6 (Tablas 12.3 y 12.4).

Tabla 12.3. Precoding Matrix codebook para 6 bits.

Índice Codebook	Capas	
	1	2
0	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
2	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix}$
3	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	-



Tabla 12.4. Asociación de bits con codebook para 6 bits.

Índice Codebook	Capas	
	1	2
0	a_0	-
1	a_1	a_4
2	a_2	a_5
3	a_3	-

Si por ejemplo se escoge un índice de Precoding Matrix: 010000, el bit a uno a_4 indicaría la Precoding Matrix $\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$

12.1.2. Channel Quality Indicator

El CQI es el indicador de la calidad del canal radio que el UE envía por el PUCCH a la estación base para informar de:

- Estado del canal.
- Tamaño de los datos que quiere recibir (comentado en 6.1.6).

La estimación de la calidad por parte del UE no está explícitamente descrita en LTE y queda abierta a libre interpretación de la persona que programe el protocolo.

En LTE existen 15 valores de CQI (4 bits), cada uno de ellos especifica un MCS lo que se traduce en una longitud mayor o menor de mensaje. Hay que tener en cuenta que el usuario también tiene en cuenta sus capacidades al escoger el CQI, es decir, para un mismo canal un UE de mejor calidad podrá permitirse un CQI más elevado que otro de menor calidad.

Existen dos parámetros de una capa superior que condicionan el MCS para un mismo CQI de la siguiente forma [66] :

If enableHOM-r12 = TRUE:

- Tabla 12.6.

Else if csi-enableHOM-r12 = TRUE:

- Tabla 12.6.

Else:

- Tabla 12.5.



Tabla 12.5. MCS para CQI 1.

Índice CQI	Modulación	Tasa Código por 1024 bits	Eficiencia
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Tabla 12.6. MCS para CQI 2.

Índice CQI	Modulación	Tasa Código por 1024 bits	Eficiencia
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	193	0.3770
3	QPSK	449	0.8770
4	16QAM	378	1.4766
5	16QAM	490	1.9141
6	16QAM	616	2.4063
7	64QAM	466	2.7305
8	64QAM	567	3.3223
9	64QAM	666	3.9023
10	64QAM	772	4.5234
11	64QAM	873	5.1152
12	256QAM	711	5.5547
13	256QAM	797	6.2266
14	256QAM	885	6.9141
15	256QAM	948	7.4063

12.1.3. Rank Indicator

El RI es un indicador del funcionamiento de las antenas, sólo se emplea en configuración MIMO, y la medida que recoge es la interferencia que se provocan entre ellas. Su valor varía en función del número de antenas, siendo su máximo el número de antenas y el menor valor la unidad.

Por ejemplo, para un caso MIMO 2x2 el RI podría valer:



- 2, las antenas no se interfieren entre ellas.
- 1, las antenas se están interfiriendo entre sí.

12.1.4. Modos de transmisión CSI

En LTE existen dos modos de transmisión del CSI, el periódico y el aperiódico. En el caso del modo periódico la subtrama y el intervalo en el que el UE debe enviar el CSI se estipula en los mensajes RRC Connection Setup y RRC Reconfiguration.

En el modo aperiódico el usuario transmite el CQI cuando la estación base se lo solicita mediante el campo “CSI Request” del DCI formato 0.

Si se diera el caso de que el usuario tuviese que transmitir un CSI periódico y uno aperiódico en la misma subtrama sólo transmitiría el aperiódico.

La estimación de la calidad del canal radio del CQI no siempre se realiza en todo el ancho de banda si no que puede repartirse en sub-bandas, en el caso del modo periódico se realiza un reparto cíclico entre mensajes CSI. El PMI también tiene dos subtipos, el singular y el múltiple, la elección de la banda del CQI y el subtipo PMI se detallan en los subapartados de los modos periódico y aperiódico.

12.1.4.1. Modo periódico

En el modo periódico el CSI se puede enviar tanto en el PUCCH como en el PDSCH:

- PUCCH, cuando en la subtrama a enviar el CSI el canal PUSCH no está configurado para transmitir.
- PUSCH, cuando se va a transmitir por el canal PUSCH en la subtrama que se desea enviar el CSI.

La configuración viene en “cqi-RportPeriodic” de la pestaña “cqi-ReportConfig” de los mensajes RRC Connection Setup o RRC Reconfiguration. En el ejemplo de comunicación real anterior el modo periódico no está habilitado por lo que se muestra un ejemplo de un mensaje RRC Connection Setup con dicha configuración.

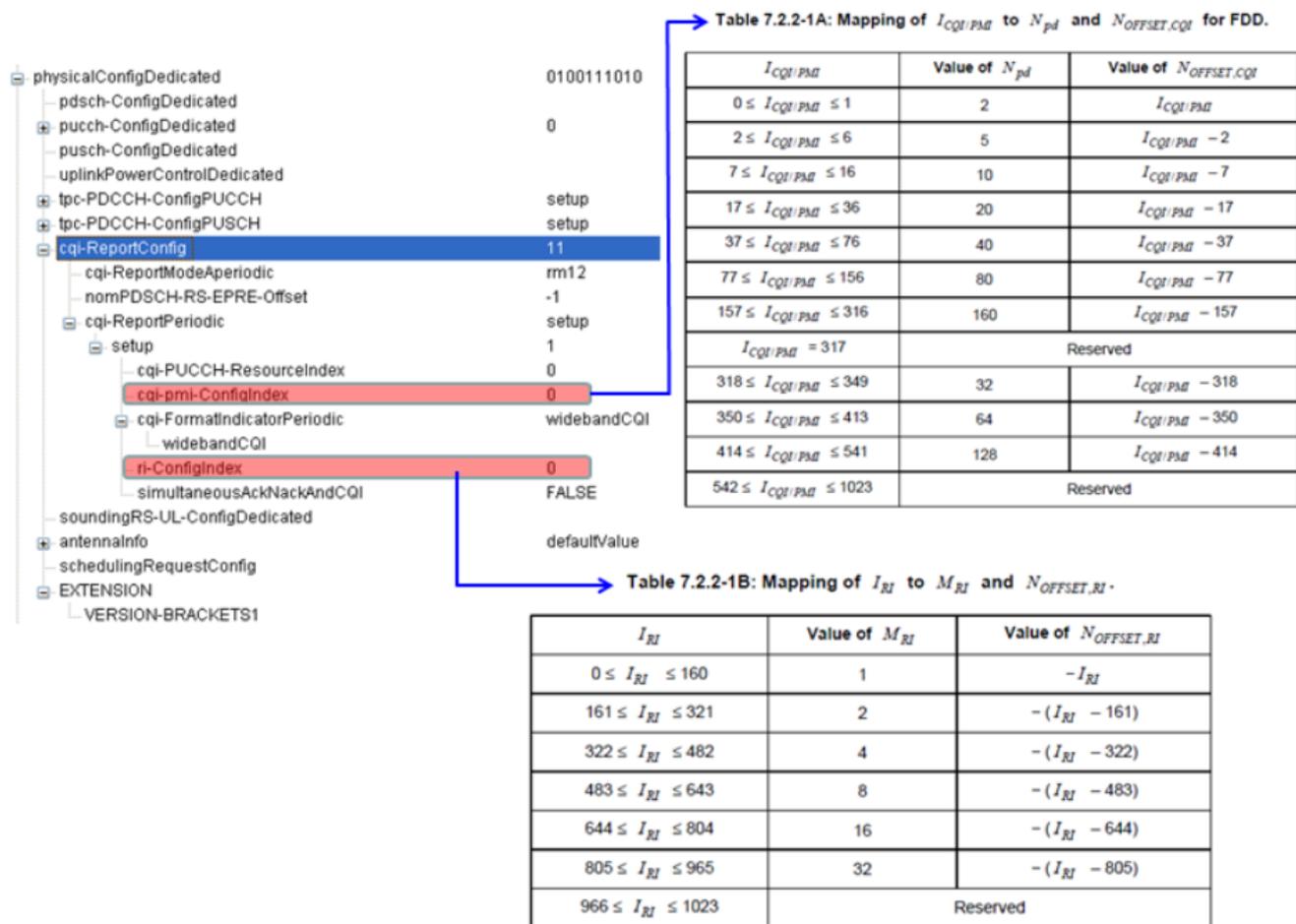


Figura 12.1 Parámetros del mensaje RRC Connection Setup para CSI [67].

A continuación, se muestran las tablas de la figura 12.1 para una mejor visualización junto con la tabla 36.213 7.2.2-1C [68] del estándar para la multiplexación TDD.

Tabla 12.7. Mapeo de $\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$ a N_{pd} y $N_{\text{OFFSET-CQI}}$ para multiplexación FDD.

$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$	N_{pd}	$N_{\text{OFFSET-CQI}}$
$0 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 1$	2	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$
$2 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 6$	5	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 2$
$7 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 16$	10	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 7$
$17 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 36$	20	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 17$
$37 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 76$	40	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 37$
$77 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 156$	80	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 77$
$157 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 316$	160	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 157$
$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} = 317$	Reservado	
$318 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 349$	32	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 318$
$350 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 413$	64	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 350$
$414 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 541$	128	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 414$
$542 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 1023$	Reservado	

Tabla 12.8. Mapeo de $\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$ a N_{pd} y $N_{\text{OFFSET-CQI}}$ para multiplexación TDD.

$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$	N_{pd}	$N_{\text{OFFSET-CQI}}$
$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} = 1$	2	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$
$1 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 5$	5	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 1$
$6 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 15$	10	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 6$
$16 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 35$	20	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 16$
$36 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 75$	40	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 36$
$76 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 155$	80	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 76$
$156 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 315$	160	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 156$
$316 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 1023$	Reservado	



Tabla 12.9. Mapeo de $\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$ a N_{pd} y $N_{\text{OFFSET-CQI}}$.

$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$	N_{pd}	$N_{\text{OFFSET-CQI}}$
$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} = 1$	2	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI}$
$1 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 5$	5	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 1$
$6 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 15$	10	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 6$
$16 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 35$	20	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 16$
$36 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 75$	40	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 36$
$76 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 155$	80	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 76$
$156 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 315$	160	$\text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} - 156$
$316 \leq \text{ConfigIndex}_{CQI/PMI} \leq 1023$	Reservado	

12.1.4.2. Modo aperiódico

El CSI sólo se envía por el canal PUSCH en el modo aperiódico, el contenido a enviar se selecciona a partir de el parámetro “cqi-ReportModeAperiodic” dentro de la pestaña “cqi-ReportConfig” de los mensajes RRC Connection Setup o RRC Reconfiguration. En el ejemplo de comunicación real mostrado anteriormente se puede observar que en el apartado 10.1 sólo está configurado el modo aperiódico.

El número de dos dígitos que contiene el parámetro “cqi-ReportModeAperiodic” es el modo de transmisión CQI, el cual se representa con los dos números separados por un guion.

Tabla 12.10. Transmisión de PMI en función de los Modos de cqi-ReportModeAperiodic.

Tipo CQI	No se envía PMI	PMI singular	PMI múltiple
Banda ancha	-	-	Modo 1-2
Sub-banda (seleccionada por el UE)	Modo 2-0	-	Modo 2-2
Sub-banda (seleccionada por capas superiores)	Modo 3-0	Modo 3-1	-

El CSI va a indicar al eNB de que forma el usuario desea que se le transmitan los datos por el canal PDSCH, por tanto, hay que tener en cuenta el modo de transmisión de dicho canal (ver en 5.8) ya que no todos soportan determinadas configuraciones CSI:

- Modo de transmisión PDSCH 1:



- Modo 2-0, 3-0.
- Modo de transmisión PDSCH 2:
 - Modo 2-0, 3-0.
- Modo de transmisión PDSCH 3:
 - Modo 2-0, 3-0.
- Modo de transmisión PDSCH 4:
 - Modo 1-2, 2-2, 3-1.
- Modo de transmisión PDSCH 5:
 - Modo 3-1.
- Modo de transmisión PDSCH 6:
 - Modo 1-2, 2-2, 3-1.
- Modo de transmisión PDSCH 7:
 - Modo 2-0, 3-0.
- Modo de transmisión PDSCH 8:
 - Modo 1-2, 2-2, 3-1. Si el UE está configurado para transmitir PMI/RI.
 - Modo 2-0, 3-0. Si el UE no está configurado para transmitir PMI/RI.
- Modo de transmisión PDSCH 9:
 - Modo 1-2, 2-2, 3-1. Si el UE está configurado para transmitir PMI/RI y el número de antenas para la transmisión del CSI es mayor de 1.
 - Modo 2-0, 3-0. Si el UE no está configurado para transmitir PMI/RI o el número de antenas para la transmisión del CSI es 1.
- Modo de transmisión PDSCH 10:
 - Modo 1-2, 2-2, 3-1. Si el UE está configurado para transmitir PMI/RI y el número de antenas para la transmisión del CSI es mayor de 1.
 - Modo 2-0, 3-0. Si el UE no está configurado para transmitir PMI/RI o el número de antenas para la transmisión del CSI es 1.

12.2. Solicitud de datos

12.2.1. UCI con Scheduling Request en PUCCH

El usuario tiene que solicitar el envío de datos a la estación base, para que esta le especifique cómo y cuándo ha de mandar el mensaje. Para ello el usuario envía una petición Scheduling Request mediante un UCI solicitando la información.

El UCI puede transmitirse tanto el canal PUCCH como en el PUSCH:

- Se transporta en el PUCCH si el UE no está transmitiendo PUSCH durante dicha subtrama. Según se explica en el apartado X
- Se transporta en el PUSCH si el UE está transmitiendo PUSCH en dicha subtrama con la excepción de si los datos transmitidos en el PUSCH son del proceso Random Access.

El UCI al igual que el DCI tiene varios formatos posibles, para la transmisión del Scheduling Request se utiliza el formato 1.

n



Tabla 12.11. Información del formato PUCCH [36.213-10.1.1].

Formato PUCCH		Información
Formato 1		Scheduling Request.
Formato 1a		HARQ ACK/NACK de 1 bit con o sin Scheduling Request.
Formato 1b	FDD (1CC)	HARQ ACK/NACK de 2 bits con o sin Scheduling Request.
	FDD (2CC)	HARQ ACK/NACK de 4 bits con selección de canal.
	TDD (1CC)	HARQ ACK/NACK de 4 bits.
Formato 2		CQI (20 bits).
Formato 2a		CQI (20 bits) y 1 bit de HARQ ACK/NACK.
Formato 2b		CQI (20 bits) y 2 bits de HARQ ACK/NACK.
Formato 3	FDD(hasta 5CC)	HARQ ACK de hasta 10 bits
	TDD(hasta 5CC)	HARQ ACK de hasta 20 bits
Formato 3	FDD(hasta 5CC)	HARQ ACK de hasta 10 bits con 1 bit para SR
	TDD(hasta 5CC)	HARQ ACK de hasta 20 bits con 1 bit para SR

12.2.1.1. Generación del UCI formato 1

Las fórmulas que se presentan a continuación para la generación del UCI son tanto para el formato 1 como para los formatos 1A y 1B, la diferencia radica en el mensaje a codificar. Dicho mensaje está representado por la variable $d(0)$, para el caso del Scheduling Request del formato 1 la variable $d(0) = 1$.



Tabla 12.12. Mensaje d(0) para cada formato UCI.

Formato UCI	b(0), ..., b(M _{bit} - 1)	d(0)
3.1	1	1
1A	0	1
	0	-1
1B	00	1
	10	-j
	10	j
	11	-1

El número d(0) se codifica en 12 números para componer la secuencia y(n):

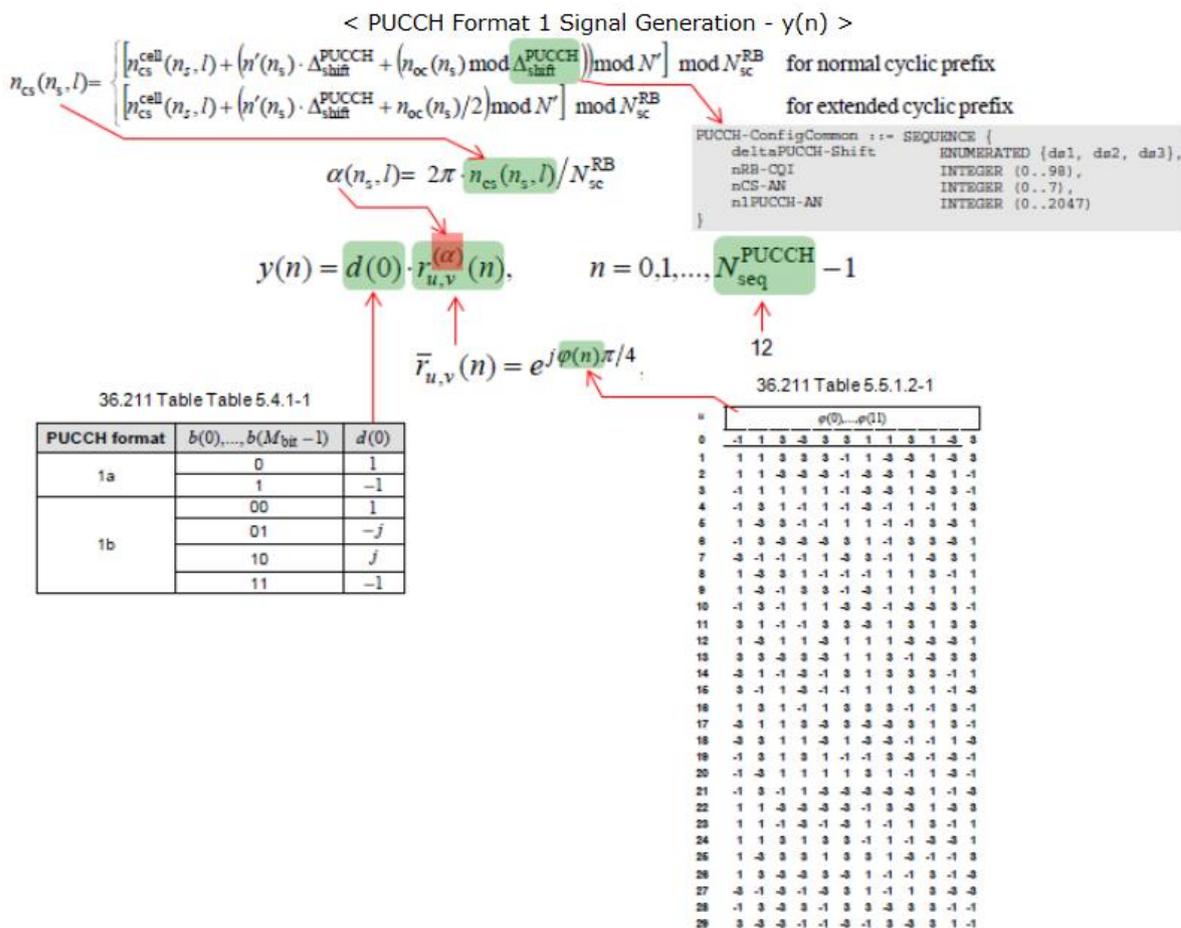




Figura 12.2. Generación del PUCCH formato 1 [47].

Tras esto se realiza un scrambling de la secuencia $y(n)$ con $S(n_s)$ y se esparce en bloques con la secuencia ortogonal específica de antena $w_{n_{oc}(i)}$:

$$z(m'. N_{SF}^{PUCCH} \cdot N_{seq}^{PUCCH} + m. N_{seq}^{PUCCH} + n) = S(n_s) \cdot w_{n_{oc}}(m) \cdot y(n) \quad (12.1)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} m &= 0, \dots, N_{SF}^{PUCCH} - 1 \\ n &= 0, \dots, N_{seq}^{PUCCH} - 1 \\ m' &= 0, 1 \\ S(n_s) &= \begin{cases} 1 & \text{si } n(n_s) \bmod 2 = 0 \\ e^{j\pi/2} & \text{si } n(n_s) \bmod 2 = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (12.2)$$

Tabla 12.13. Secuencias ortogonales PUCCH para índices de secuencia con factor de dispersión 3

Índice de secuencia $n_{oc}(n_s)$ $N_{SF}^{PUCCH} = 3$	Secuencias ortogonales $w(0) \dots w(N_{SF}^{PUCCH} - 1)$
0	[1 1 1]
1	[1 $e^{j2\pi/3}$ $e^{j4\pi/3}$]
2	[1 $e^{j4\pi/3}$ $e^{j2\pi/3}$]

Tabla 12.14. Secuencias ortogonales PUCCH para índices de secuencia con factor de dispersión 4.

Índice de secuencia $n_{oc}(n_s)$ $N_{SF}^{PUCCH} = 4$	Secuencias ortogonales $w(0) \dots w(N_{SF}^{PUCCH} - 1)$
0	[+1 +1 +1 +1]
1	[+1 -1 +1 -1]
2	[+1 -1 -1 +1]

El índice de secuencia se calcula:



$$n_{oc}(n_s) = \begin{cases} \left\lfloor \frac{n'(n_s) \cdot \Delta_{shift}^{PUCCH}}{N'} \right\rfloor & \text{para CP normal} \\ 2 \left\lfloor \frac{n'(n_s) \cdot \Delta_{shift}^{PUCCH}}{N'} \right\rfloor & \text{para CP extendido} \end{cases} \quad (12.3)$$

12.2.1.2. Ubicación del UCI formato 1

El canal físico PUCCH en frecuencia se encuentra en los extremos inferiores o superiores del ancho de banda del canal. En cada slot cambia de extremo situándose en las frecuencias más bajas si en el slot anterior se encontraba en las más altas y viceversa.

Las fórmulas utilizan parámetros del SIB2 y del mensaje RRC Connection Setup:

$$m = \begin{cases} N_{RB}^{(2)} & \text{si } n_{PUCCH}^{(1)} < c \cdot \frac{N_{CS}^{(1)}}{\Delta_{shift}^{PUCCH}} \\ \left\lfloor \frac{n_{PUCCH}^{(1)} - c \cdot \frac{N_{CS}^{(1)}}{\Delta_{shift}^{PUCCH}}}{c \cdot \frac{N_{SC}^{RB}}{\Delta_{shift}^{PUCCH}}} \right\rfloor + N_{RB}^{(2)} + \left\lfloor \frac{N_{CS}^{(1)}}{8} \right\rfloor & \text{resto} \end{cases} \quad (12.4)$$

Dónde:

$$c = \begin{cases} 3 & \text{si CP normal} \\ 2 & \text{si CP extendido} \end{cases}$$

$$N_{SC}^{RB} = 12$$

$$n_{PUCCH}^{(1)} = n_{CCE} + N_{PUCCH}^{(1)}$$

El resto de variables se encuentran en el SIB2, el ejemplo del apartado 4.1.8 tiene resaltado en azul la zona dónde se encuentran.

12.2.2. DCI formato 0 en PDCCH

El usuario monitoriza un DCI formato 0 con su C-RNTI durante las sucesivas subtramas Downlink para obtener la información que le permita preparar el mensaje en el canal PUSCH.



Tabla 12.15. Parámetros de un DCI formato 0.

Formato 0 – C-RNTI (datos específicos de usuario)		
Parámetro	Nº bits	Comentario
Flag para diferenciarlo de formato 1	1	-
Hopping flag	1	-
N_ULhop	1 (1.4, 3 y 5 MHz) 2 (resto)	Válido cuando hopping flag es 1
Resource Block Assignment	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 7 (5 MHz) 11 (10 MHz) 12 (15 MHz) 13 (20 MHz)	-
MCS and RV	5	-
NDI	1	-
TPC PUSCH	2	Control de potencia
Cyclic shift para DM RS	3	
UL Index	2	Sólo para TDD configuración 0
Downlink Assignment Index	2	Sólo para TDD configuración 1-6
CSI request	1 o 2	Activa CSI en modo aperiódico

Si el Hopping flag está activado el parámetro N_ULhop indica el hopping en frecuencia según la siguiente Tabla 12.16:

Tabla 12.16. Hopping en frecuencia en función de N_ULhop si el valor de Hopping flag es cero.

Anchos de banda	N_ULhop	$\tilde{n}_{PRB}(i)$
1.4, 3 y 5 Mhz	0	$(\lfloor N_{RB}^{PUSCH} / 2 \rfloor + \tilde{n}_{PRB}^{S1}(i)) \bmod N_{RB}^{PUSCH}$
	1	Hopping tipo 2
10, 15 y 20 MHz	00	$(\lfloor N_{RB}^{PUSCH} / 4 \rfloor + \tilde{n}_{PRB}^{S1}(i)) \bmod N_{RB}^{PUSCH}$
	01	$(-\lfloor N_{RB}^{PUSCH} / 4 \rfloor + \tilde{n}_{PRB}^{S1}(i)) \bmod N_{RB}^{PUSCH}$
	10	$(\lfloor N_{RB}^{PUSCH} / 2 \rfloor + \tilde{n}_{PRB}^{S1}(i)) \bmod N_{RB}^{PUSCH}$
	11	Hopping tipo 2

Dónde:

$$N_{RB}^{PUSCH} = \begin{cases} N_{RB}^{UL} - \tilde{N}_{RB}^{HO} - (N_{RB}^{UL} \bmod 2) & \text{Para tipo 1} \\ N_{RB}^{UL} & \text{Para tipo 2 con } N_{sb} > 1 \\ N_{RB}^{UL} - \tilde{N}_{RB}^{HO} & \text{Para tipo 2 con } N_{sb} = 1 \end{cases} \quad (12.5)$$



$$\tilde{N}_{RB}^{HO} = \begin{cases} N_{RB}^{HO} + 1 & \text{si } N_{RB}^{HO} \text{ es impar} \\ N_{RB}^{HO} & \text{si } N_{RB}^{HO} \text{ es par} \end{cases} \quad (12.6)$$

$$\tilde{n}_{PRB}^{S1} = RB_{start} \text{ del UL grant en RAR} \quad (12.7)$$

La ubicación del mensaje en el canal PUSCH se obtiene mediante el RIV de manera similar a la del apartado 4.4:

$$\begin{aligned} &\text{if } (L_{CRBs} - 1) \leq \lfloor N_{RB}^{UL} / 2 \rfloor \text{ then} \\ &\quad RIV = N_{RB}^{UL} (L_{CRBs} - 1) + RB_{START} \\ &\text{else} \\ &\quad RIV = N_{RB}^{UL} (N_{RB}^{UL} - L_{CRBs} + 1) + (N_{RB}^{UL} - 1 - RB_{START}) \end{aligned} \quad (12.8)$$

El parámetro Cyclic shift especifica el número de desplazamientos cíclicos que hay que aplicar a las señales de referencia (DMRS) en el canal PUSCH, de manera similar a la que se producen en los pilotos de referencia en Downlink con el ID de celda.

Tabla 12.17. Desplazamientos cíclicos según el parámetro Cyclic Shift.

Bits en Cyclic Shift	n_{DMRS}
000	0
001	6
010	3
011	4
100	2
101	8
110	10
111	9

12.2.3. Datos en PUSCH

Una vez decodificada la información del DCI 0 el usuario conoce dónde debe ubicar los datos y en qué momento debe enviarlos (4 ms después de haber recibido el DCI formato 0).

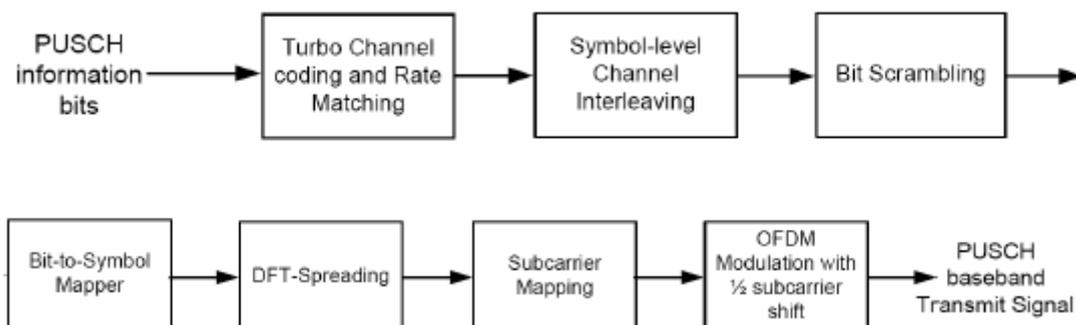


Figura 12.3. Codificación y modulación del canal PUSCH [17].

Esta figura 12.3 se muestra el proceso de codificación de los datos, así como el mapeo a las subportadoras indicadas tras realizar una operación DFT Spreading tal y como se explica en el apartado 1.2.2, sobre la generación de señales SC-FDMA.

12.2.4. HARQ en PHICH

El proceso es idéntico al explicado en el apartado 4.5.

12.2.5. Datos en PDSCH

El usuario monitoriza con su C-RNTI subtramas cuyo PDCCH contenga un DCI formato 1 que le indiquen la ubicación del mensaje en el canal PDSCH. Con la información del DCI extrae el mensaje del canal PDSCH. La estación base puede transmitir DCIs formato 1, 1A, 1B o 1C con la información de decodificación del mensaje PDSCH:

- DCI formato 1, sólo transmite Scheduling de mensajes PDSCH.
- DCI formato 1A, puede transmitir también el RARM y es más compacto que el formato 1.
- DCI formato 1B, transmite Scheduling de mensajes PDSCH precodificados y es más compacto que el formato 1.
- DCI formato 1C, es el más compacto de todos.



Tabla 12.18. Parámetros DCI formato 1 con C-RNTI.

Formato 1 – C-RNTI (datos específicos de usuario)		
Parámetro	Nº bits	Comentario
Resource Allocation header	1	Especifica RA tipo 0 o 1
Resource block Assignment, tipo 0	6 (1.4 MHz) 8 (3 MHz) 13 (5 MHz) 17 (10 MHz) 19 (15 MHz) 25 (20 MHz)	Válido cuando el RA header es 0
Subset	N/A (1.4 Mhz) 1 (3 y 5 MHz) 2 (resto)	Válido cuando el RA header es 1
Shift	- (1.4 MHz) 1 (resto)	Válido cuando el RA header es 1
Resource block Assignment, tipo 1	- 6 (3 MHz) 13 (5 MHz) 14 (10 MHz) 16 (15 MHz) 22 (20 MHz)	Válido cuando el RA header es 1
MCS	5	-
HARQ Process	3 (FDD) 4 (TDD)	-
RV	2	-
TPC PUCCH	2	-
Downlink Assignment Index	X	Sólo en TDD. 36.212, Tabla 5.3.3.1.2
HARQ-ACK Resource Offset	2	Sólo si DCI va en EPDCCH



Tabla 12.19. Parámetros DCI formato 1A con C-RNTI.

Formato 1A – C-RNTI (datos específicos de usuario)		
Parámetro	Nº bits	Comentario
Flag para diferenciarlo de formato 0/1	1	-
Localized/Distributed VRB Assignment flag	1	-
N_Gap	1	Sólo si VRB flag es 1 y BW \geq 10MHz <ul style="list-style-type: none"> • 0 = N_Gap 1 • 1 = N_Gap 2
Resource Block Assignment para Localized	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 9 (5 MHz) 11 (10 MHz) 12 (15 MHz) 13 (20 MHz)	-
Resource Block Assignment para Distributed	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 9 (5 MHz) 10 (10 MHz) 11 (15 MHz) 12 (20 MHz)	-
MCS	5	-
HARQ Process	3 (FDD) 4 (TDD)	-
RV	2	-
TPC PUCCH	2	Control de potencia
Downlink Assignment Index	X	Sólo en TDD
SRS Request	0 o 1	Sólo para UE modo búsqueda específica
HARQ-ACK Resource Offset	2	Sólo si el DCI es transportado por EPDCCH



Tabla 12.20. Parámetros DCI formato 1A con RA-RNTI, P-RNTI y SI-RNTI.

Formato 1A – RA-RNTI (Random Access), P-RNTI (paginado), SI-RNTI (SIBs)		
Parámetro	Nº bits	Comentario
Flag para diferenciarlo de formato 0/1	1	-
Localized/Distributed VRB Assignment flag	1	-
N_Gap	1	Sólo si VRB flag es 1 y BW >= 10MHz <ul style="list-style-type: none"> • 0 = N_Gap 1 • 1 = N_Gap 2
Resource Block Assignment para Localized	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 9 (5 MHz) 11 (10 MHz) 12 (15 MHz) 13 (20 MHz)	-
Resource Block Assignment para Distributed	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 9 (5 MHz) 10 (10 MHz) 11 (15 MHz) 12 (20 MHz)	-
MCS	5	-
HARQ Process	3 (FDD) 4 (TDD)	-
NDI	1	Sólo si el ancho de banda en DL es mayor de 5MHz
RV	2	
TPC (MSB)	1 (Reservado)	
TPC (LSB)	1	-
Downlink Assignment Index	X	Sólo en TDD
HARQ-ACK Resource Offset	2	Sólo si el DCI es transportado por EPDCCH



Tabla 12.21. Parámetros DCI formato 1B con C-RNTI.

Formato 1B – C-RNTI (datos específicos de usuario)		
Parámetro	Nº bits	Comentario
Flag para diferenciarlo de formato 0/1A	1	-
Localized/Distributed VRB Assignment flag	1	-
N_Gap	1	Sólo si VRB flag es 1 y BW \geq 10MHz <ul style="list-style-type: none"> • 0 = N_Gap 1 • 1 = N_Gap 2
Resource Block Assignment para Localized	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 9 (5 MHz) 11 (10 MHz) 12 (15 MHz) 13 (20 MHz)	-
Resource Block Assignment para Distributed	5 (1.4 MHz) 7 (3 MHz) 9 (5 MHz) 10 (10 MHz) 11 (15 MHz) 12 (20 MHz)	-
MCS	5	-
HARQ Process	3 (FDD) 4 (TDD)	-
RV	2	-
TPC PUCCH	2	Control de potencia
TPMI para precoding	2 (2 antenas) 4 (4 antenas)	-
PMI para precoding	1	-



Tabla 12.22. Parámetros DCI formato 1B con RA-RNTI, P-RNTI y SI-RNTI.

Formato 1B – RA-RNTI (Random Access), P-RNTI (paginado), SI_RNTI (SIBs)		
Parámetro	Nº bits	Comentario
N_Gap	1	Sólo si VRB flag es 1 y BW >= 10MHz <ul style="list-style-type: none"> • 0 = N_Gap 1 • 1 = N_Gap 2
Resource Block Assignment	3 (1.4 MHz) 5 (3 MHz) 7 (5 MHz) 6 (10 MHz) 8 (15 MHz) 9 (20 MHz)	-
MCS	5	-

Tabla 12.23. Parámetros DCI formato 1B M-RNTI.

Formato 1B – M-RNTI (Información de cambio en MCCH)	
Parámetro	Nº bits
MCCH Change Notification	8
Reserved	N/A (1.4 MHz) 2 (3 MHz) 4 (5 MHz) 5 (10 MHz) 6 (15 MHz) 7 (20 MHz)

12.2.5.1. Resource Allocation Type

El RA Type especifica la forma en que se asignan los RB para cada transmisión. En LTE existen tres tipos diferentes de RA, tipos 0, 1 y 2, donde cada uno utiliza un procedimiento predefinido.



Tabla 12.24. Ubicación de los recursos según el formato DCI.

Formato DCI	RA Type posible	Elección
1	Tipo 0 o 1	Cabecera del DCI
1A	Tipo 2	-
1B	Tipo 2	-
1C	Tipo 2	-
1D	Tipo 2	-
2	Tipo 0 o 1	Cabecera del DCI
2A	Tipo 0 o 1	Cabecera del DCI

- **Tipo 0:**
Se dividen los RB en grupos (RBG), el número de RB por cada RBG varía según el ancho de banda del sistema.

Tabla 12.25. Tamaño de los Resource Block Groups para cada ancho de banda.

Ancho de banda (MHz)	Tamaño RBG
1.4	1
3	2
5	2
10	3
15	4
20	4

La cadena de bits en el DCI de “resource allocation” indicará con un “1” si dicho RBG contiene el mensaje y con un “0” si no lo contiene. El mensaje se fragmenta y se coloca por orden en los RBG correspondientes.

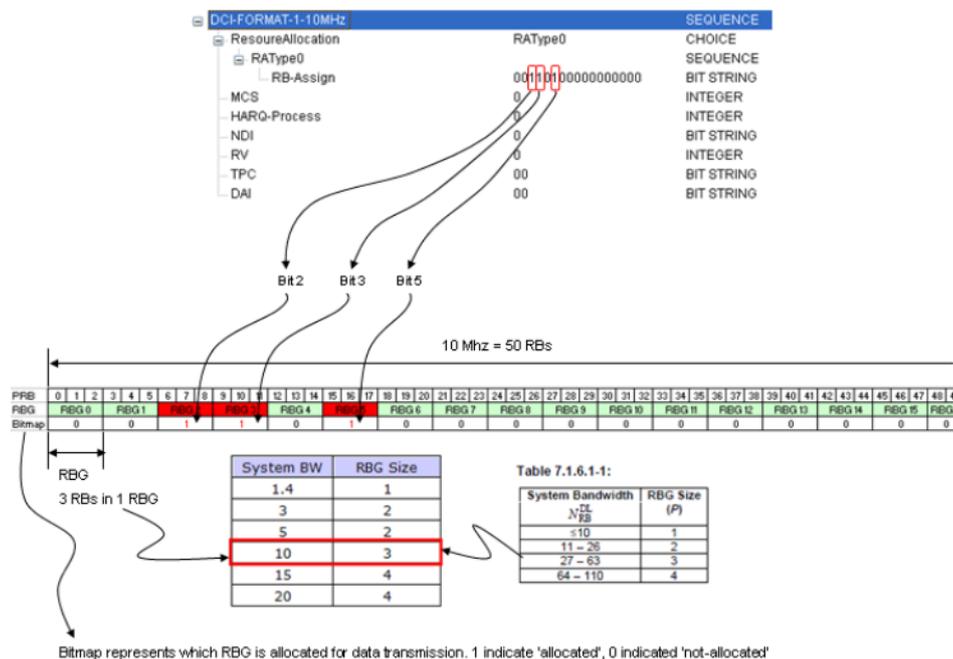


Figura 12.4. Ubicación de los RBG para RAType 0 [17].

- **Tipo 1:**
En este caso los RBG se clasifican en subsets y únicamente los RBG del subset escogido conforman las posiciones de la cadena de bits “resource allocation”, como ejemplo gráfico:

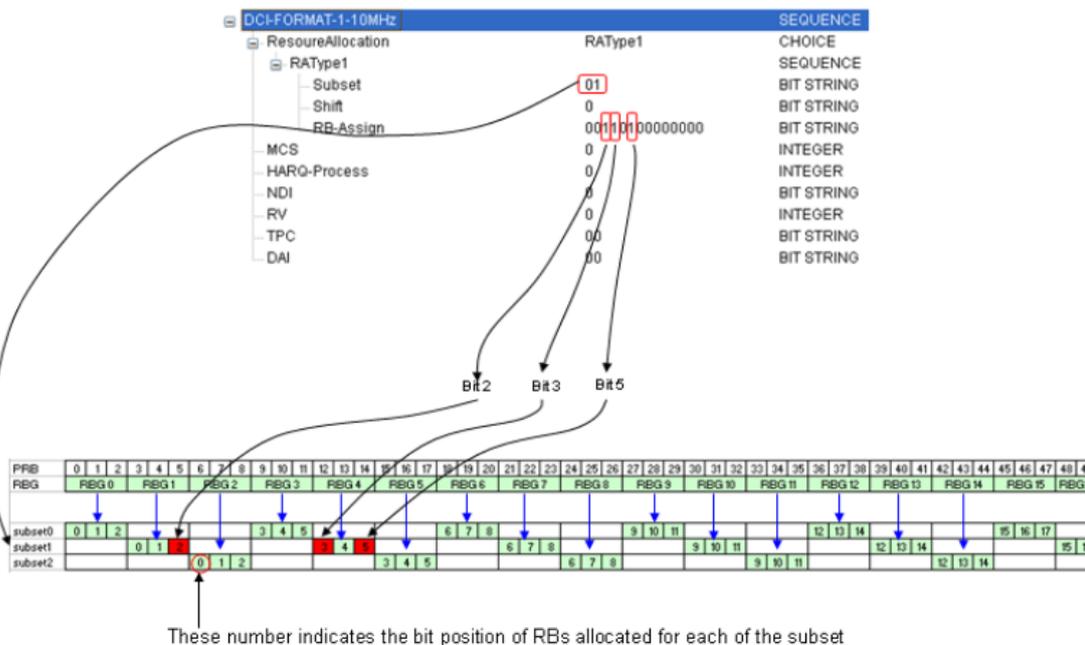


Figura 12.5. Ubicación de los RBG para RAType 1 [17].



- **Tipo 2:**
Se ubican en una serie de RBs contiguos, este concepto se refiere a capa MAC y puede que los RBs no sean contiguos a nivel de capa física por lo que deberá de haber un algoritmo que sea capaz de pasar de esta ubicación lógica a una ubicación física. La conversión puede ser localizada o distribuida, en la primera los RBs son contiguos tanto para la capa MAC como para la capa física, en distribuida los RB no se encuentran en subportadoras contiguas.

12.2.6. UCI con HARQ en PUCCH

En el caso de únicamente enviar información HARQ el procedimiento es el mismo que el explicado en el apartado 5.2.1 pero con los formatos 1A (SISO) y 1B (MIMO). La elección de otro formato modificará el mensaje $d(0)$ a enviar pero los pasos de codificación y ubicación son idénticos.

Si se desea enviar información CSI junto a el HARQ se ha de emplear un UCI formato 2A (SISO) o 2B (MIMO), en este caso la generación y la ubicación varían respecto al formato 1.

12.2.6.1. Generación del UCI formato 2

Se codifican los 20 bits de datos en una cadena $d(n)$ de 10 números complejos.

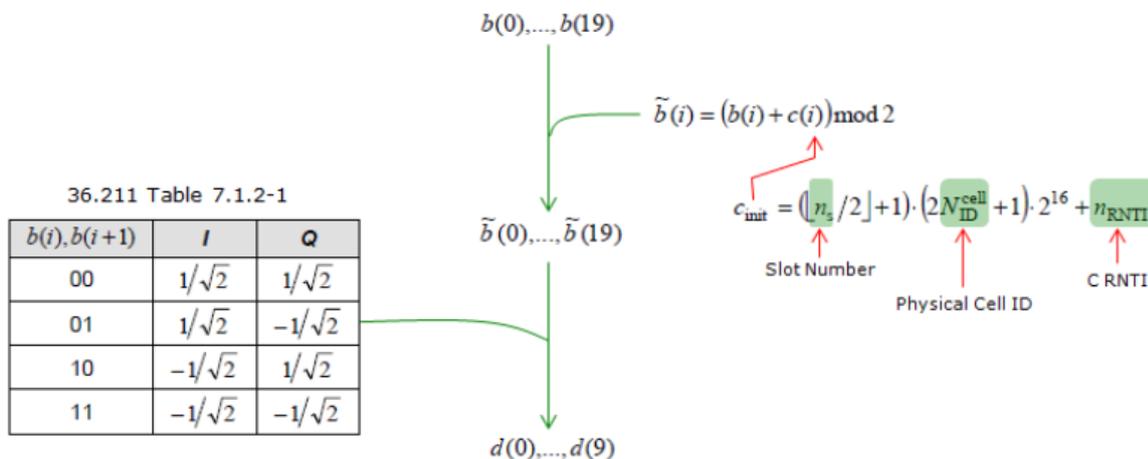


Figura 12.6. Codificación de los datos en UCI formato 2 [17].

Se realiza un rate matching sobre $d(n)$ para obtener una cadena $z(n)$ de 120 números complejos.

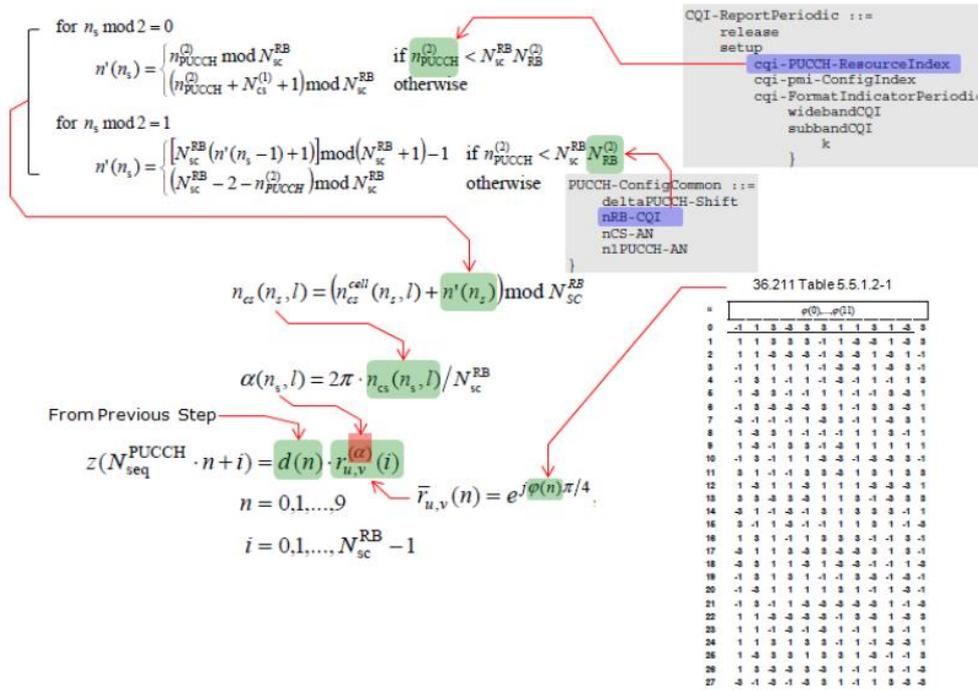


Figura 12.7. Rate Matching de los bits codificados en UCI formato 2 [17].

12.2.6.2. Ubicación del UCI formato 2

El proceso es parecido al del apartado 5.2.1 para el formato 1 pero las fórmulas son más simples:

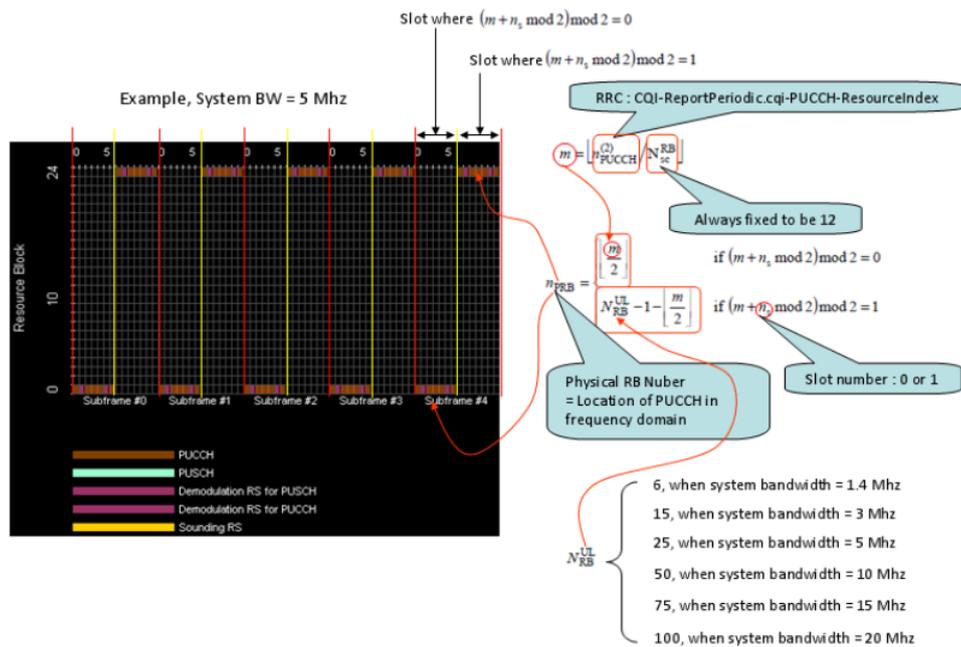


Figura 12.8. Ubicación en el RG del UCI formato 2 [17].



12.3. Paginado

El paginado es el mecanismo mediante el cual la estación base avisa al usuario de que tiene información que le podría interesar. Para ello el usuario debe estar en modo escucha (RRC Idle Mode) lo que consume batería en el celular, por tanto, una parte importante en el proceso de paginado son las técnicas que permiten reducir el consumo de potencia en el usuario.

Principalmente el mecanismo de paginado consiste en que el usuario y el eNB tienen “acordado” que los mensajes de paginado sólo se envíen en determinados momentos, por lo que la estación base los acumula para después los enviarlos en ráfagas.

- Durante el modo Idle el UE permanece en un modo dormido a la espera, especificado por el parámetro DefaultPagingCycle del SIB2 (marcado en rojo en 6.1.8).
- El UE despierta de forma periódica y monitoriza el PDCCH con un P-RNTI (0xFFFE) que tenga información de paginado.
- En caso de que encuentre el DCI con dicho paginado, comprueba el canal PDSCH para ver si dicha información estaba destinada para él.

12.3.1. Paging Frame

Una Paging Frame (PF) es una trama LTE que puede contener una o varias Paging Occasion (PO), las PF se calculan con la siguiente fórmula:

$$PF = SFN \bmod T = (T \operatorname{div} N) * UE_{ID} \bmod N$$

$$UE_{ID} = \begin{cases} S - TMSI \\ IMSI \bmod 1024 \end{cases} \quad (12.9)$$

$$N = \min(T, nB)$$

Dónde T es el parámetro DefaultPagingCycle, nB otro parámetro del SIB2 (se encuentra justo a continuación de DefaultPagingCycle), IMSI (International Mobile Subscriber Identity) es un número de 64 bits único para cada celular y asociado a la tarjeta SIM y S-TMSI (Serving Temporary Mobile Subscriber Identity) es un identificador para el MME que el UE obtiene durante el NAS attaching.

En la fórmula de la identidad del usuario hay dos posibilidades, la primera con S-TMSI es la opción habitual y sólo se emplea IMSI módulo 1024 (IMSI en decimal) cuando se ha producido un error durante el registro NAS. En este caso la red envía un mensaje de paginado con IMSI, tras lo cual el UE se formatea a nivel NAS y reintenta el attaching.

12.3.2. Paging Occasion

La Paging Occasion (PO) es la subtrama en la cual puede transmitirse un DCI con P-RNTI para indicar el mensaje de paginado. Las subtramas en las cuales se puede enviar el mensaje de paginado dependen de los parámetros i_s y N_s :



$$i_s = \left\lfloor \frac{UE_{ID}}{N} \right\rfloor \bmod N_s \quad (12.10)$$

$$N_s = \max \left(1, \frac{nB}{T} \right) \quad (12.11)$$

Tabla 12.26. Subtramas de Paging Occasion en FDD.

N_s	PO para $i_s = 0$	PO para $i_s = 1$	PO para $i_s = 2$	PO para $i_s = 3$
1	9	N/A	N/A	N/A
2	4	9	N/A	N/A
4	0	4	5	9

Tabla 12.27. Subtramas de Paging Occasion en TDD (todas las configuraciones DL/UL).

N_s	PO para $i_s = 0$	PO para $i_s = 1$	PO para $i_s = 2$	PO para $i_s = 3$
1	0	N/A	N/A	N/A
2	0	5	N/A	N/A
4	0	1	5	6

13

Introducción a 5G

El propósito de este capítulo es el de introducir las características e ideas principales que conforman 5G a partir de lo ya explicado en LTE, es decir, se denotarán las variaciones principales entre un estándar y otro ya que 5G recoge muchos conceptos y procesos de la generación anterior.

En primer lugar, denotar que los canales físicos de Downlink PHICH y PCFICH desaparecen en 5G, esto es debido a que el protocolo HARQ de 5G es puramente asíncrono y a que el número de recursos destinados al PDCCH ya no varía dinámicamente[69].

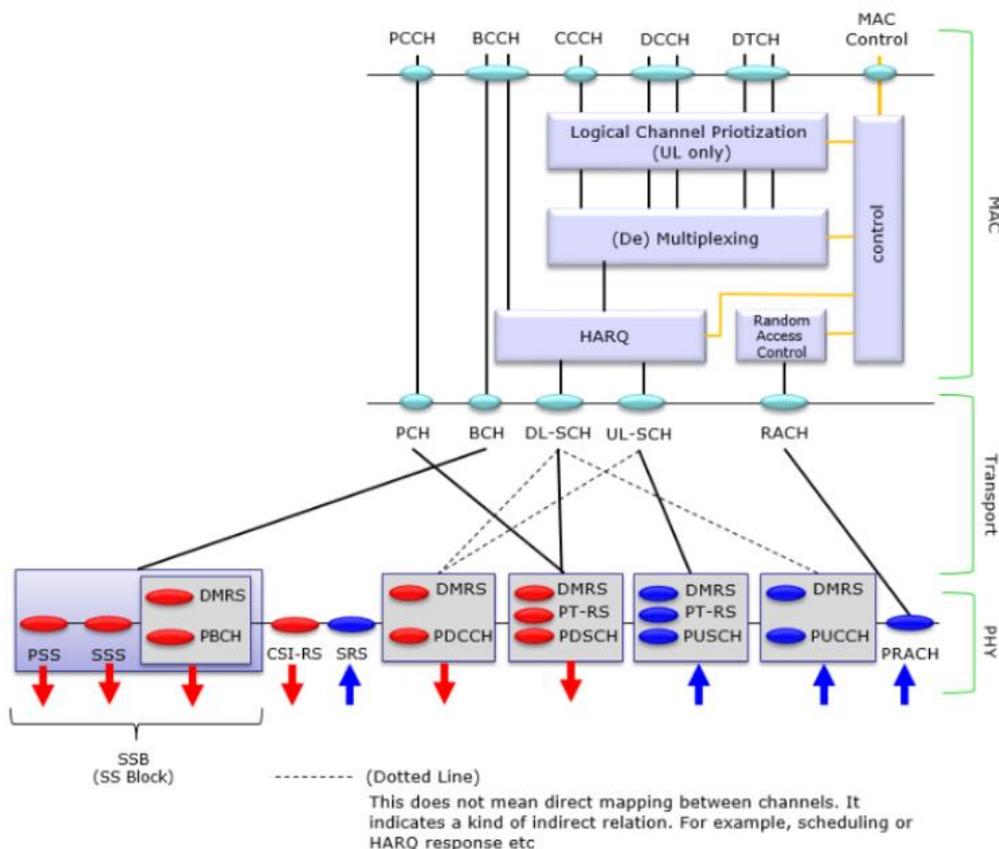


Figura 13.1. Canales y señales de la capa física y MAC en 5G [70].



13.1. Estructura temporal y frecuencial de la trama

El espacio entre subportadoras ya no está siempre fijado a 15KHz si no que ahora puede tomar 6 posibles valores (aunque el último aun no se soporta en la versión actual de 5G), además, sólo una de estas configuraciones puede soportar un prefijo cíclico extendido.

Tabla 13.1. Variaciones en la estructura de la trama 5G en función del espacio entre subportadoras.

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15KHz$	Duración símbolo OFDM (μs)	Duración CP (μs)	Símbolos OFDM por slot	Duración slot (ms)	Símbolos OFDM por slot
0	15	66.67	4.69	14	1	1
1	30	33.33	2.34	14	0.5	2
2	60	16.67	1.17	14	0.25	4
			4.68	12		
3	120	8.33	0.57	14	0.125	8
4	240	4.17	0.29	14	0.0625	16

En 5G se introduce el concepto de “mini-slot” [71] los cuales pueden ocupar 7,4 o 2 símbolos OFDM y se utilizan en caso de aplicaciones que requieran una muy baja latencia, además, en multiplexación FDD los slots pueden transportar información Downlink y Uplink entremezclada (desaparece la distribución por subtramas), aparece por tanto un nuevo parámetro denominado SFI (Slot Format Indicator) que indica que slot es Downlink, Uplink o flexible. El SFI puede variar de forma dinámica empleando DCIs o de manera semi estática mediante la configuración/reconfiguración RRC.

13.2. Beam Management

Debido a la aparición de nuevas bandas elevadas de frecuencia surge el concepto de “beam” o haz, esto es debido a que para radiar a estas frecuencias se emplea un array de antenas lo que genera una radiación directiva con forma de haz, algo que no ocurre en frecuencias más bajas dónde se produce una onda más omnidireccional [71].

Este efecto físico a frecuencias elevadas conlleva a que sea muy complicado cubrir un amplio número de UEs en una única transmisión, con la excepción de que dichos UE estén muy próximos entre sí. Surge por tanto la necesidad de establecer un mecanismo que permita mediante haces direccionales permitir la conectividad de usuarios situados en cualquier ángulo respecto a el gNB (equivalente a eNB en LTE).

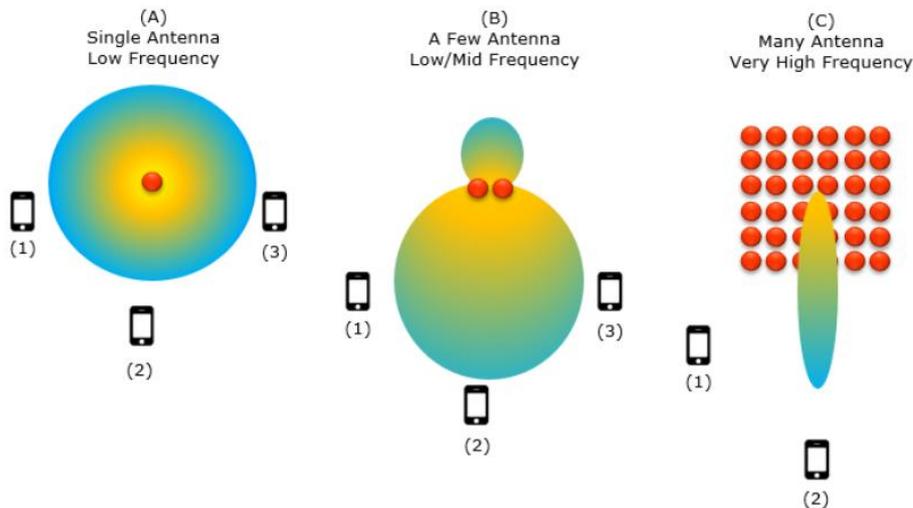


Figura 13.2.. Comparativa de la directividad del diagrama de radiación [72] .

Estado 1: localización del receptor desconocida

Este es el momento en el que el UE desea conectarse a la red por primera vez (por ejemplo, cuando se enciende) y detectar las señales de sincronización que le permitan decodificar la trama Downlink. La transmisión de múltiples haces en todas las direcciones por parte del gNB es un mecanismo muy poco eficiente energéticamente por lo que la opción en 5G es la de modificar el array de antenas en pequeños instantes de tiempo de tal forma que el único haz direccional barra todos los ángulos con un determinado periodo.

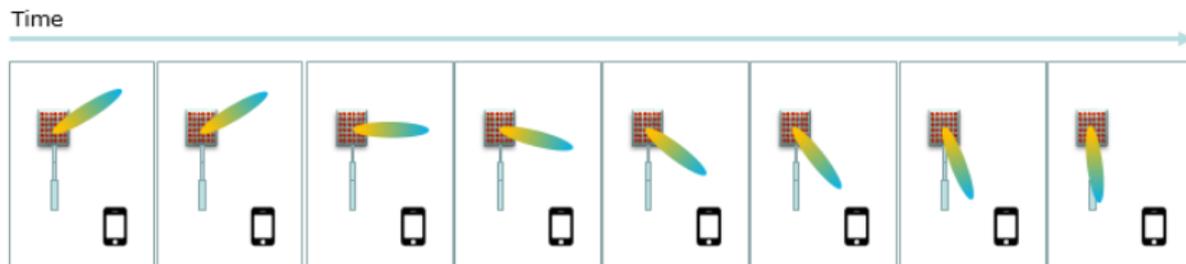


Figura 13.3.. Haz barriendo 360° en busca de un UE [72] .

Esta idea repercute directamente en el diseño de la trama así como en el mecanismo de sincronización mediante las señales PSS y SSS, esto se cubrirá más adelante en el apartado de sincronización.

Estado 2: conexión ya establecida

Una vez el UE completa el acceso inicial a la celda, éste puede mantener la comunicación con el gNB de cuatro formas diferentes, las cuales dependen del número de haces direccionales y del número de TRP (Transmission and Reception Architecture, arrays de

antenas capaces de generar uno o múltiples haces direccionales que conforman la estructura MIMO en 5G.

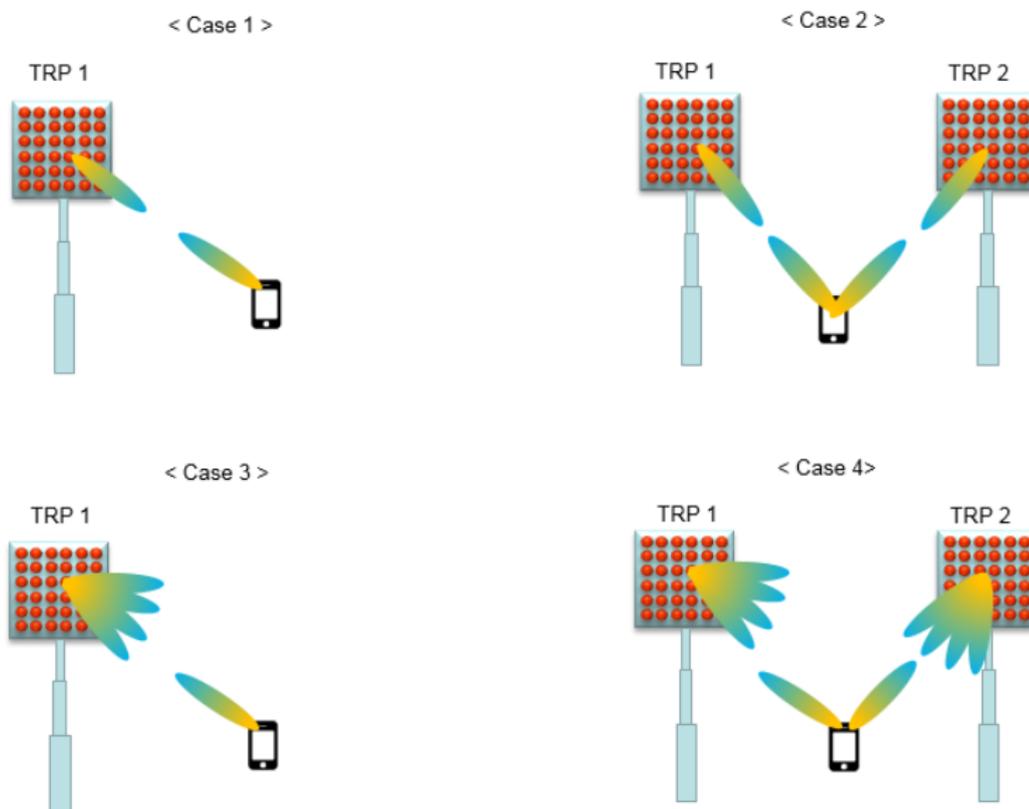


Figura 13.4. Cuatro posibles casos de conectividad entre el UE y gNB en 5G [72] .

- Caso 1: UE y gNB conectados por un único beam y un único TRP.
- Caso 1: UE y gNB conectados por un único beam por cada TRP y múltiples TRP.
- Caso 1: UE y gNB conectados por múltiples beams y un único TRP.
- Caso 1: UE y gNB conectados por múltiples beams de múltiples TRP.

La gestión de estas configuraciones se realiza mediante las señales de referencia específicas de usuario y el feedback del UE de manera bastante similar al mecanismo de CSI visto en LTE.

Cuando el gNB está transmitiendo, éste calcula la dirección del haz evaluando la calidad de las señales SRS en Uplink de múltiples beams escogiendo la mejor de ellas. Cuando el UE está transmitiendo realiza el mismo proceso esta vez mediante las señales de referencia en Downlink que pudiendo utilizar el SSB (Synchronization Signal Block) o la CSI-RS (Channel State Indicator Reference Signal).

13.3. Sincronización

En 5G se introduce el concepto de SSB [69] como bloque de sincronización, el cual es simplemente las dos señales de sincronización PSS y SSS junto con el canal PBCH y sus señales DMRS. Se define este bloque de sincronización ya que la posición de estas señales y el canal PBCH varía en 5G de forma dinámica dependiendo del espacio entre subportadoras y la frecuencia del canal radio.

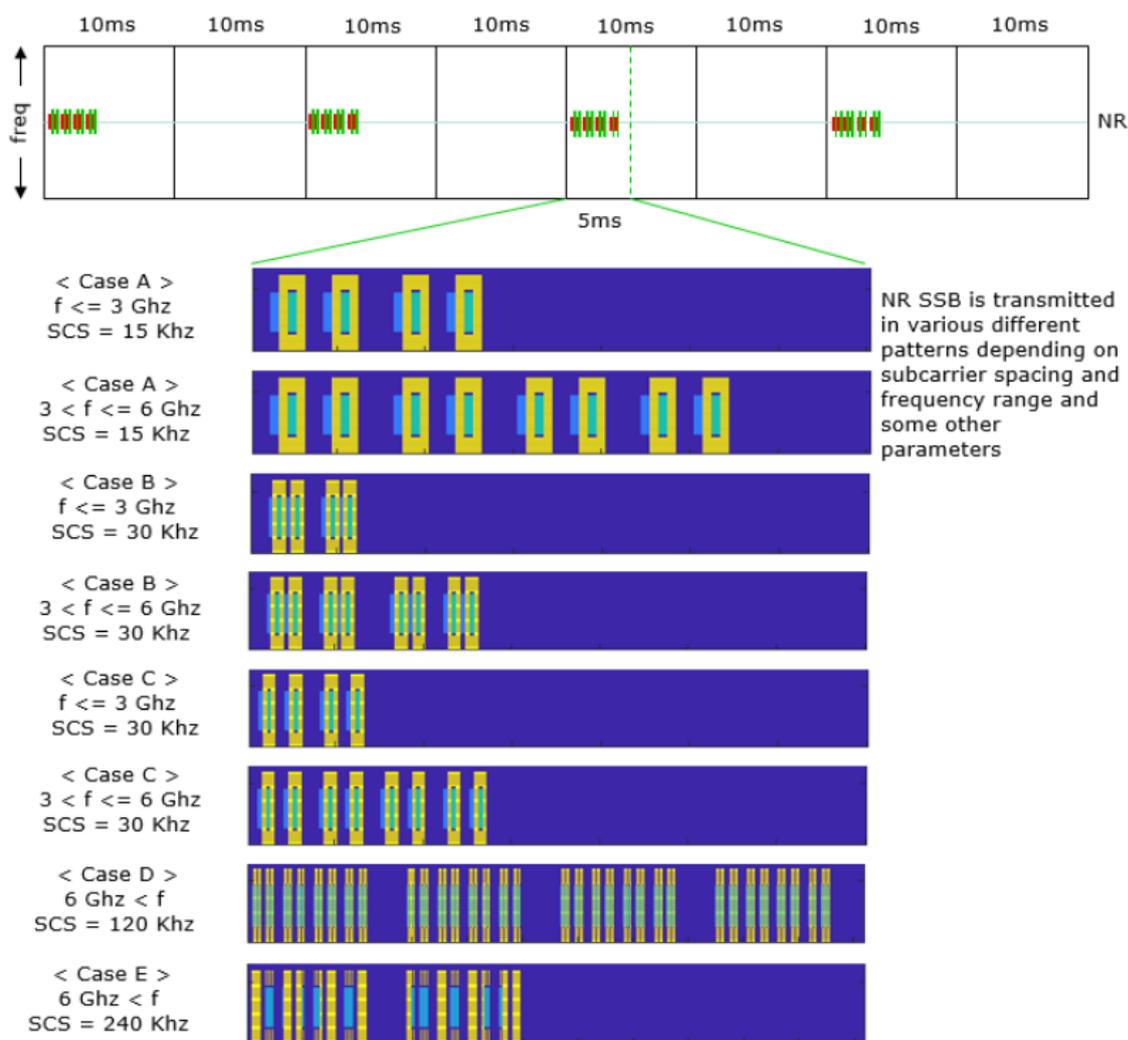


Figura 13.5. Ubicación de los SSB en 5G [73].

Cada beam porta un SSB y el usuario escoge aquel que le llegue con mejor intensidad.

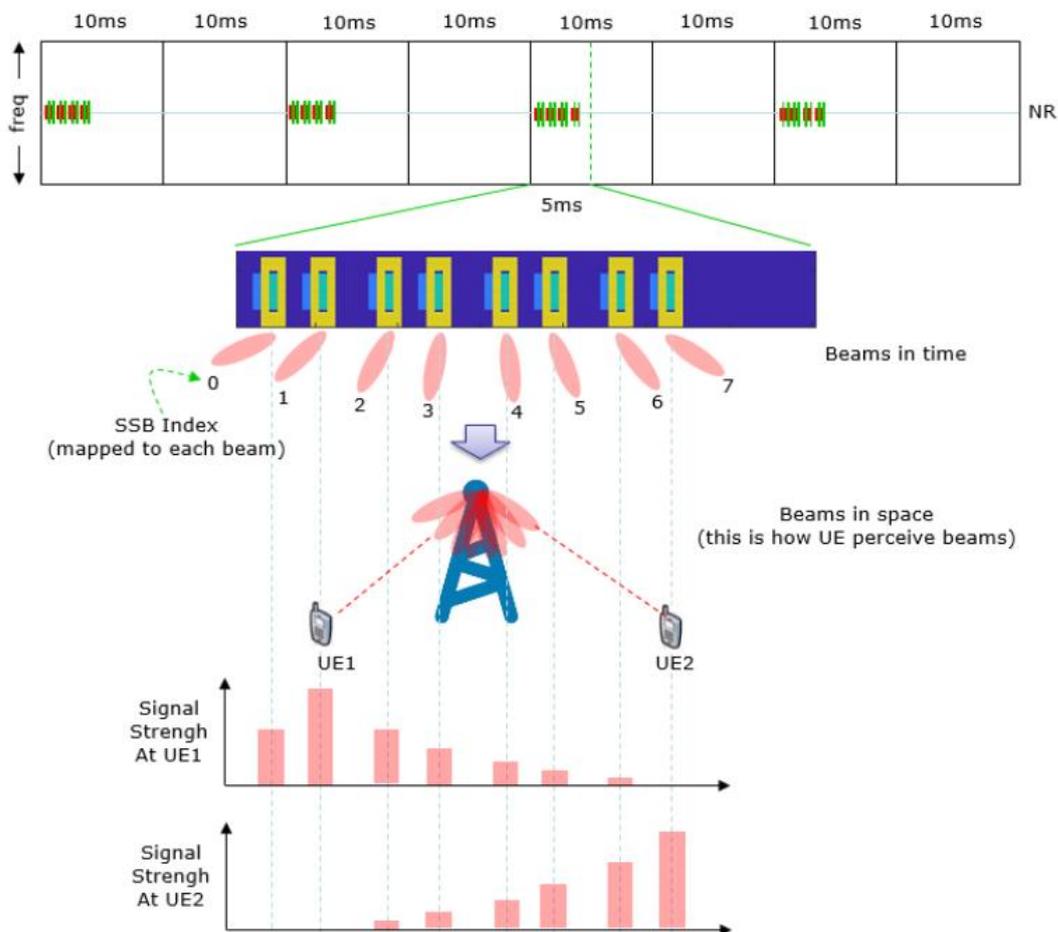


Figura 13.6. Reparto de los SSB en diferentes beams [72].

Cada uno de estos beam tiene asociado un índice temporal que el usuario es capaz de identificar en las PBCH DMRS, dicho índice se utiliza para construir el preámbulo en el proceso RACH de conexión a la celda, el cual es similar en concepto es similar al ya explicado en LTE.

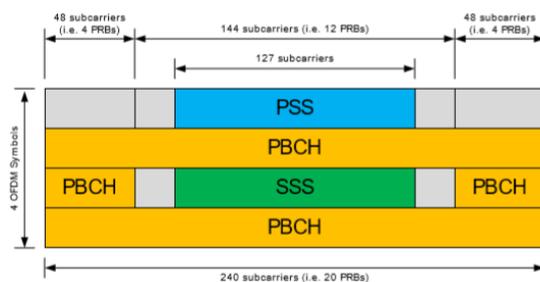


Figura 13.7. Dimensiones de las señales de sincronización y el PBCH en 5G [74].



Tal y como se puede apreciar en la figura 13.7 el número de subportadoras destinadas para las dos señales de sincronización aumentan de 72 en LTE a 127 en 5G, el PBCH también incrementa su número hasta poder alcanzar las 240, además ocupa 96 subportadoras en el mismo símbolo OFDM que la señal SSS.

El canal PBCH en 5G sufre dos operaciones de scrambling, la primera es directamente sobre los bits del MIB previamente a la incorporación del CRC, además se sustituye el código convolucional por el código polar, un tipo de código corrector de errores descrito por Erdal Arikian en 2009 [cita].

13.4. PDCCH y PDSCH

El canal PDCCH mantiene las características de LTE, la única variación son los DCI que transporta, ya que estos han de transportar dos indicadores nuevos [69]. El SFI (ya comentado anteriormente) que indica al usuario si un determinado slot está destinado a Downlink o a Uplink y el PI (Preemption Indicator) empleado para ayudar al usuario a identificar la causa de errores en los paquetes y que parte del paquete se encuentra libre de dichos errores.

El número de formatos DCI para esta versión de 5G es muy reducido en comparación con LTE.

Tabla 13.2. Resumen de los formatos DCI en 5G.

Formato DCI	Uso
0_0	Configuración del canal PUSCH en una celda
0_1	Configuración del canal PUSCH en una celda
1_0	Configuración del canal PDSCH en una celda (varía en función del RNTI)
1_1	Configuración del canal PUSCH en una celda
2_0	Notificación a grupo de UEs del formato de los slots
2_1	Notificación a grupo de UEs de que símbolos OFDM/RB no están destinados para datos de dichos usuarios.
2_2	Transmisión de comandos TPC para PUCCH y PUSCH
2_3	Transmisión de comandos TPC para señales de referencia SRS

A el canal PDSCH además de las señales DMRS se le añade las PT-RS (Phase Tracking Reference Signal).

- DMRS
 - Ubicación temporal
 - A: se transmiten durante los símbolos OFDM dos y tres del canal PDSCH. Suplen a las señales de referencia específicas de celda CRS en LTE (ya que en 5G se eliminan) para demodular el canal PDSCH.



- B: se transmiten durante el primer símbolo OFDM del canal PDSCH, se utilizan para la configuración mini-slot.
- Ubicación frecuencial
 - 1: las DMRS se sitúan en subportadoras alternas, por cada puerto de antena se utiliza una secuencia ortogonal distinta.
 - 2: las DMRS se agrupan en grupos de dos, permite mayor número de secuencias ortogonales por lo que se usa en multiuser MIMO.
 - PT-RS: se utilizan para estimar y minimizar el efecto CPE (Common Phase Error) en el rendimiento del sistema. Este error de fase en 5G pasa a un plano significativo debido al incremento en la frecuencia de transmisión.

El canal PDSCH así como el resto de los canales se codifica con técnicas diferentes a las vistas en LTE, el objetivo de este capítulo sin embargo no es más que introducir los cambios respecto al estándar anterior sin entrar en detalle.

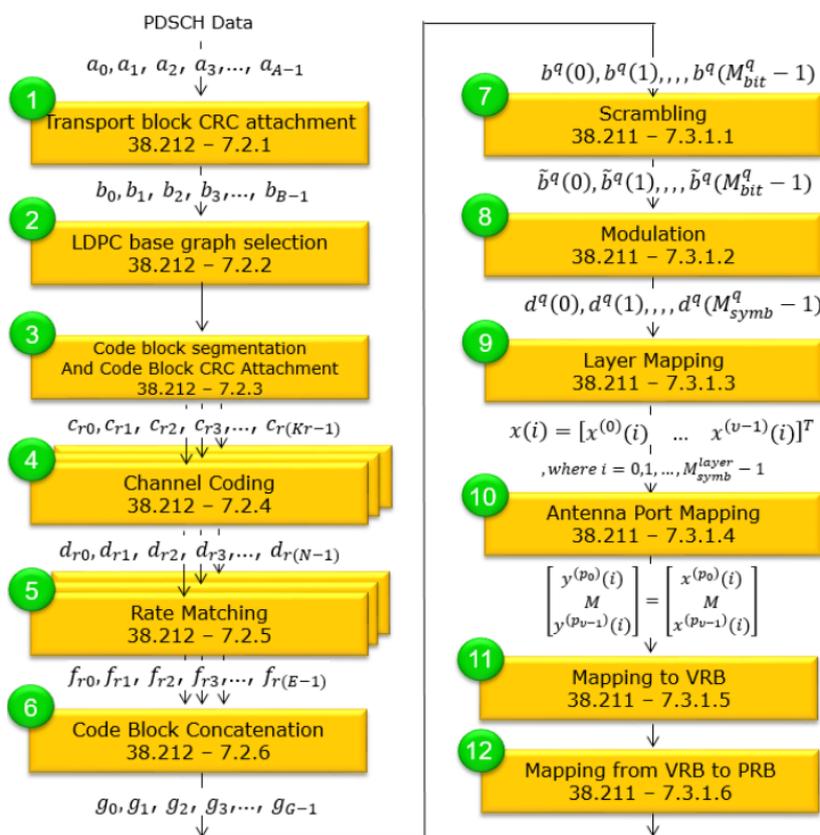


Figura 13.8. Proceso de codificación del canal PDSCH en 5G [75].

En el caso de los canales de datos (PDSCH y PUSCH) en vez de utilizar un código polar se emplean LDPC (Low Density Parity-check Code). El proceso de scrambling y Rate matching varía ligeramente respecto al visto en LTE pero el concepto es similar.



13.5. PUCCH y PUSCH

La estructura y los procesos de los canales Uplink no varía apenas con respecto a LTE. El mayor cambio es a nivel de modulación puesto que se elimina SC-FDMA por OFDM para MIMO y DFT-s-OFDM (Discrete Fourier Transform spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing) para transmisiones con un solo puerto de antena.

En función de la modulación empleada las señales PUSCH DMRS se generan de determinada manera:

- OFDM: secuencia Gold.
- DFT-s-OFDM: secuencia Zadoff-Chu.

En 5G se emplea HARQ asíncrono, para ello se añade un parámetro en el DCI denominado “Processor Number” que indica el número de transmisión. Las respuestas ACK/NACK se realizan por orden siguiendo este número y ya no esperan un tiempo fijo como en LTE (por ejemplo 4 ms en multiplexación FDD) si no que depende de la configuración RRC establecida.

Existen 5 formatos de PUCCH para transmitir los UCI, las respuestas HARQ y los SR.

Tabla 13.3. Tamaño de los formatos PUCCH en 5G.

Formato PUCCH	Nº de símbolos OFDM	Nº de bits
0	1-2	≤ 2
1	4-14	≤ 2
2	1-2	> 2
3	4-14	> 2
4	4-14	> 2

Los formatos 3 y 4 aún están por definir en el estándar, los formatos 0 y 2 conforman PUCCH de longitud corta puesto que ocupan únicamente de 1 a 2 símbolos OFDM frente al formato 1 que puede ocupar desde 4 hasta 14.

- Formato 0 (longitud corta)
 - Secuencia con bajo PAPR de 12 RE.
 - La información a transmitir es la propia secuencia, existen 4 posibles.
 - Puede transmitir:
 - HARQ.
 - SR
- Formato 2 (longitud corta)
 - Las DMRS se mapean en los REs {1,4,7,10} de cada RB.
 - Los UCI ocupan los REs restantes.
 - Multiplexación de UCI y DMRS en frecuencia.



- Formato 1 (longitud larga)
 - Secuencia de 12 RE.
 - Símbolos OFDM reservados para UCI o DMRS alternamente.
 - Multiplexación de UCI y DMRS en tiempo.

13.6. Resumen 5G

Por último, se incluye una tabla resumen comparando características entre LTE y 5G para finalizar el capítulo introductorio a la capa física y MAC en 5G.

Tabla 13.4. Resumen de diferencias entre LTE y 5G.

Características	LTE	5G
Ancho de banda máximo	20 MHz	50 MHz (15 KHz subportadoras) 100 MHz (30 KHz subportadoras) 200 MHz (60 KHz subportadoras) 400 MHz (120 KHz subportadoras)
Canales radio	5	16
Separación entre subportadoras	15 KHz	2ª. 15KHz
Modulación	OFDM (Downlink) SC-FDMA (Uplink)	OFDM (Downlink) OFDM/DFT-s-OFDM(Uplink)
Nº máximo de subportadoras	1200	3300
Latencia	10 ms	1 ms
Codificación de canal	Turbo Código (datos) TBCC (control)	LDPC (datos) Código Polar (control)
Acceso inicial	Sin Beamforming	Con Beamforming
MIMO	LTE 4x4 LTE-A 8x8	8x8
Configuración DL/UL	A nivel de subtrama	A nivel de slot



14

Conclusiones y Líneas Futuras

En este trabajo se han recopilado y resumido los contenidos que componen las capas física y MAC del protocolo de comunicación inalámbrica LTE. Además, se ha implementado un equipo usuario en Matlab capaz de demodular y decodificar tramas provenientes de un eNB, así como de generar las respuestas que le permiten establecer una conexión con la red LTE.

De forma paralela se ha establecido una conexión LTE mediante el uso de OpenAirInterface de EURECOM, que compone un entorno verificado y completo en todas las capas que conforman LTE. Se han capturado los paquetes de dicha conexión para un posterior análisis a nivel MAC mediante el uso del programa Wireshark.

En primer lugar, se ha puesto en contexto la evolución y la situación actual de los estándares de comunicación móviles así como su utilización en los entornos industriales. En segundo lugar, se han explicado las técnicas de acceso y modulaciones del estándar LTE que condicionan el diseño de los transmisores y receptores LTE.

Se ha detallado la estructura y la funcionalidad de la capa física y MAC en LTE además de introducir capas superiores para proporcionar una visión de conjunto apoyándose en las simulaciones y ejemplos reales ya comentados. Por último, se han especificado las nuevas características que componen la nueva generación o 5G a partir de lo ya explicado en el estándar LTE, lo que permite una mejor asimilación de los conceptos, así como reutilizar y/o modificar componentes y procesos ya vistos.

El objetivo a alcanzar actualmente es proseguir con el trabajo abordado y llegar a implementar un transmisor y un receptor LTE/5G sobre una FPGA (Field Programmable Gate Array). La implementación mediante VHDL genera un circuito mucho más optimizado frente a otros lenguajes de programación sobre microprocesadores de propósito general. Además, la capacidad de controlar los mecanismos y procesos a nivel hardware permite modificar y ajustar parámetros para cumplir con las exigencias que demandan los entornos industriales.

La implementación de un estándar de comunicación inalámbrica completo programando directamente mediante el lenguaje VHDL se torna una tarea prácticamente imposible debido a su complejidad y magnitud. Por tanto, el planteamiento a seguir es el de utilizar la herramienta de Matlab HDL Coder, el cual permite utilizar bloques lógicos y modelos de Simulink previamente verificados que se compilan directamente sobre lenguaje VHDL de manera muy eficiente.





Referencias

- [1] M. Wollschlaeger, T. Sauter, y J. Jasperneite, «The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0», *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, pp. 17-27, mar. 2017, doi: 10.1109/MIE.2017.2649104.
- [2] «IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group». <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html> (accedido jun. 16, 2020).
- [3] «White Papers < 5G-PPP». <https://5g-ppp.eu/white-papers/> (accedido jun. 24, 2020).
- [4] S. Pankaj, «Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network», *IJCSMC*, vol. 2, n.º 8, pp. 47-53, ago. 2013.
- [5] «3GPP TS 21.101 version 3.13.0 Release 1999-Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system». Accedido: jun. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/121100_121199/121101/03.13.00_60/ts_121101v031300p.pdf.
- [6] «UTRAN - Telecom ABC». <http://www.telecomabc.com/u/utran.html> (accedido jun. 24, 2020).
- [7] «3GPP TS 25.308 version 10.5.0 Release 10- Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2». Accedido: jun. 21, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125300_125399/125308/10.05.00_60/ts_125308v100500p.pdf.
- [8] «HSPA». <https://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/99-hspa> (accedido jun. 21, 2020).
- [9] G. Abed, «Queue size comparison for standard transmission control protocol variants over high-speed traffics in LTE-A network», *Scientific research and essays*, vol. 9, pp. 984-987, dic. 2014, doi: 10.5897/SRE2014.6133.
- [10] 3GPP.org, «LTE-Release 8 User Equipment Categories Table», *4G LTE TDD/FDD*, nov. 04, 2011. <https://tdlte.wordpress.com/2011/11/04/lte-release-8-user-equipment-categories-table/> (accedido jun. 24, 2020).
- [11] «Broadband Wireless Networking Lab». <https://bwn.ece.gatech.edu/ltea/projectdescription.html> (accedido jun. 24, 2020).
- [12] J. Dadkhah Chimeh, «4G to 5G migration through Core Network», *The Modares Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, n.º 2, pp. 11-14, jun. 2016, Accedido: jun. 20,



2020. [En línea]. Disponible en: <http://journals.modares.ac.ir/article-17-10636-en.html>.
- [13] «5G Standards - What You Need to Know», *SDxCentral*.
<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-standards/> (accedido jun. 24, 2020).
- [14] D. S. Pawar y D. A. Deshpande, «Evolution of Wireless Technology», *International Journal of Computer Science and Mobile Computing. IJCSMC.*, vol. 9, n.º 4, pp. 91 – 94, abr. 2020.
- [15] R. van Nee y R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, 1st ed. USA: Artech House, Inc., 2000.
- [16] Y. Jia, X. Tu, y W. Yan, «An UAV Wireless Communication Noise Suppression Method Based on OFDM Modulation and Demodulation», *Radio Science*, vol. 55, n.º 2, p. e2019RS006959, 2020, doi: 10.1029/2019RS006959.
- [17] S. Sesia, I. Toufik, y M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, 2011.
- [18] B. P. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems 3e Osece*, 3rd ed. USA: Oxford University Press, Inc., 1998.
- [19] T. Jiang y Y. Wu, «An Overview: Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for OFDM Signals», *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 54, n.º 2, pp. 257-268, jun. 2008, doi: 10.1109/TBC.2008.915770.
- [20] A. Seyedi y G. J. Saulnier, «General ICI self-cancellation scheme for OFDM systems», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, n.º 1, pp. 198-210, ene. 2005, doi: 10.1109/TVT.2004.838849.
- [21] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, 2009.
- [22] D. Rai y A. Dwivedi, «LTE Theory to Practice- KPI Optimization (A 4G Wireless Technology)», 2018. /paper/LTE-Theory-to-Practice-KPI-Optimization-(A-4G-Rai-Dwivedi/1e37f88e9960e3cf40439816815e97d9a89c52ce (accedido jun. 17, 2020).
- [23] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [24] «Single-carrier FDMA», *Wikipedia*. may 27, 2020, Accedido: jun. 18, 2020. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Single-carrier_FDMA&oldid=959186253.
- [25] «Frame Structure type 1».
https://www.sharetechnote.com/html/FrameStructure_DL.html#Overview (accedido jun. 17, 2020).
- [26] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, y Johan Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband - 2nd Edition*, 2.ª ed. Oxford: Academic Press-Elsevier, 2014.
- [27] «4G LTE Bands and Frequencies». <https://www.wiserepeater.com/4g-lte-bands-and-frequencies-tdd-fdd-lte> (accedido jun. 17, 2020).



- [28] «LTE resource grid». http://www.sqimway.com/lte_resource_grid.html (accedido jun. 17, 2020).
- [29] A. Yonis y M. F. L. Abdullah, «Downlink and Uplink Physical Channels in Long Term Evolution», *International Journal of Information Technology and Computer Science*, vol. 4, pp. 1-10, oct. 2012, doi: 10.5815/ijitcs.2012.11.01.
- [30] J. S. Sobolewski, «Cyclic redundancy check», en *Encyclopedia of Computer Science*, GBR: John Wiley and Sons Ltd., 2003, pp. 476–479.
- [31] S. Zarei, «Channel Coding and Link Adaptation», p. 14.
- [32] «3GPP TS 36.212 version 8.8.0 Release 8- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding». Accedido: jun. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/08.08.00_60/ts_136212v080800p.pdf.
- [33] «ShareTechnote-Handbook_Communication_GoldCode». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_Communication_GoldCode.html (accedido jun. 18, 2020).
- [34] «Synchronization Signals (PSS and SSS) - MATLAB & Simulink». <https://es.mathworks.com/help/lte/ug/synchronization-signals-pss-and-sss.html> (accedido jun. 26, 2020).
- [35] «3GPP TS 36.211 version 11.0.0 Release 11- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation». Accedido: jun. 17, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/11.00.00_60/ts_136211v110000p.pdf.
- [36] «ShareTechnote-Handbook_LTE». https://162.144.118.42/html/Handbook_LTE.html (accedido jun. 17, 2020).
- [37] J. Milos̃ y S. Hanus, «Performance Analysis of PCFICH and PDCCH LTE Control Channels», vol. 23, n.º 1, p. 7, 2014.
- [38] «ShareTechnote-Handbook_LTE_PCFICH». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PCFICH.html (accedido jun. 24, 2020).
- [39] S. S. A. Abbas, R. L. Praba, y S. J. Thiruvengadam, «Realization of Physical Hybrid ARQ Indicator Channel for LTE using FPGA», *Procedia Engineering*, vol. 30, pp. 426-434, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.881.
- [40] «ShareTechnote-DCI». <https://www.sharetechnote.com/html/DCI.html> (accedido jun. 24, 2020).
- [41] «ShareTechnote-Handbook_LTE_RNTI». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_RNTI.html (accedido jun. 23, 2020).



- [42] «ShareTechnote-Handbook_LTE_PDCCH». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PDCCH.html (accedido jun. 24, 2020).
- [43] A. Pérez, *LTE and LTE Advanced: 4G Network Radio Interface*. John Wiley & Sons, 2015.
- [44] «3GPP TS 38.202 version 15.5.0 Release 15- 5G; NR; Services provided by the physical layer». Accedido: jun. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138202/15.05.00_60/ts_138202v150500p.pdf.
- [45] S. Ahmadi, «Downlink Physical Layer Functions», en *LTE-Advanced*, S. Ahmadi, Ed. Academic Press, 2014, pp. 399-720.
- [46] «ShareTechnote - Handbook_LTE_CSI». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_CSI.html (accedido jun. 18, 2020).
- [47] «ShareTechnote - Handbook_LTE_PUCCH_Format». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PUCCH_Format.html (accedido jun. 18, 2020).
- [48] M. Bouzouita, Y. Hadjadj-Aoul, N. Zangar, S. Tabbane, y C. Viho, «A random access model for M2M communications in LTE-advanced mobile networks», en *Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems*, M. S. Obaidat, P. Nicopolitidis, y F. Zarai, Eds. Boston: Morgan Kaufmann, 2015, pp. 577-599.
- [49] «3GPP TS 36.331. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification. 2011». Accedido: jun. 17, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/08.02.00_60/ts_136331v080200p.pdf.
- [50] «Data Flow Across LTE Protocol Layers ~ Telecom Insights». <http://trends-in-telecoms.blogspot.com/2015/02/data-flow-across-lte-protocol-layers.html> (accedido jun. 23, 2020).
- [51] «ShareTechnote-MAC_LTE.» https://www.sharetechnote.com/html/MAC_LTE.html (accedido jun. 23, 2020).
- [52] J. M. H. Rábanos, L. M. Tomás, y J. M. R. Salís, *Comunicaciones móviles*. Editorial Universitaria Ramon Areces, 2015.
- [53] J. Agrawal, P. Mor, J.M. Keller, y P. Dubey, «LTE: User Equipment (UE) States», *Int. adv. res. j. sci. eng. technol.*, vol. 3, n.º Special Issue 4, nov. 2016.
- [54] «ShareTechnote- Full Stack». https://162.144.118.42/html/FullStack_LTE.html (accedido jun. 17, 2020).
- [55] A. ElNashar y M. A. El-saidny, *Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT: Paving the way towards 5G*. John Wiley & Sons, 2018.
- [56] H. Ibad y R. S. Kawitkar, «LTE Network Structure, QoS Considerations, Bearers



and Interfaces», *International Journal of Engineering and Computer Science*, vol. 5, n.º 7, Art. n.º 7, 2016, Accedido: jun. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://103.53.42.157/index.php/ijecs/article/view/1419>.

[57] «ShareTechnote - Handbook_LTE_NB_LTE». http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_NB_LTE.html (accedido jun. 17, 2020).

[58] «ShareTechnote-RACH_LTE». http://www.sharetechnote.com/html/RACH_LTE.html (accedido jun. 24, 2020).

[59] «3GPP TS 36.321 version 12.5.0 Release 12-LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification». Accedido: jun. 25, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136321/12.05.00_60/ts_136321v120500p.pdf.

[60] R. P. Jover, «LTE security, protocol exploits and location tracking experimentation with low-cost software radio», *arXiv:1607.05171 [cs]*, jul. 2016, Accedido: jun. 24, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1607.05171>.

[61] «LTE Modulation and Coding Scheme (MCS)». http://anisimoff.org/eng/lte_mcs.html (accedido jun. 24, 2020).

[62] «ShareTechnote - BasicCallFlow_LTE». https://www.sharetechnote.com/html/BasicCallFlow_LTE.html#7_RRCCConnectionSetup (accedido jun. 19, 2020).

[63] «ShareTechnote-Handbook_LTE_BSR». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_BSR.html (accedido jun. 24, 2020).

[64] «LTE Layers Data Flow». https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_layers_data_flow.htm (accedido jun. 24, 2020).

[65] R. Nivedha, A. P. Nithyapriya, y K. N. Kumari, «Performance Analysis of LTE System based on Precoding Matrix Indicator», *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 598-606, ene. 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.074.

[66] «3GPP TS 36.213 version 12.4.0 Release 12- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures». Accedido: jun. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/12.04.00_60/ts_136213v120400p.pdf.

[67] «ShareTechnote-Handbook_LTE_CQI_PMI_RI_Reporting Configuration». https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_CQI_PMI_RI_ReportingConfiguration.html (accedido jun. 25, 2020).

[68] «TS 36.213 (1Q20/568 p.) – E-UTRA Physical Layer Procedures». <https://www.tech-invite.com/3m36/tinv-3gpp-36-213.html> (accedido jun. 23, 2020).

[69] H. Kim, *Design and Optimization for 5G Wireless Communications*, 1.ª ed. Wiley,



2020.

[70] «5G | ShareTechnote-5G_ChannelMapping».

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_ChannelMapping.html (accedido jul. 07, 2020).

[71] H. Holma, S. Kalyanasundaram, y V. Venkatesan, «5G Performance», en *5G Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2019, pp. 239-303.

[72] «5G | ShareTechnote- 5G_Phy_BeamManagement».

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_BeamManagement.html (accedido jul. 07, 2020).

[73] «5G - Waveform Candidate - 5G | ShareTechnote».

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_SS_Block.html (accedido jul. 07, 2020).

[74] J. Campos, «Understanding the 5G NR Physical Layer», *Keysight Technologies*, 2017.

https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Understanding_the_5G_NR_Physical_Layer.pdf.

[75] «5G | ShareTechnote-5G_PDSCH».

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_PDSCH.html (accedido jul. 07, 2020).