



**Máster en Redes de Telecomunicación  
para Países en Desarrollo**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**PROYECTO FIN DE MÁSTER**

**Análisis de la viabilidad de la modificación de la  
enmienda IEEE 802.16j para su aplicación en la banda  
no licenciada de 5 GHz**

**Autor: Carlos Rey Moreno  
Tutor: Francisco Javier Simó Reigadas**

Carlos Rey Moreno

Curso académico 2009/2010



## ACTA DE EVALUACIÓN

Alumno: Carlos Rey Moreno

Titulación: Máster en Redes de Telecomunicación para Países en Desarrollo

Título del Proyecto: Análisis de la viabilidad de la modificación de la enmienda IEEE 802.16j para su aplicación en la banda no licenciada de 5 GHz

Tutor: Dr. Ing. Francisco Javier Simó Reigadas

### TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

### CALIFICACIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

	Presidente	Vocal	Secretario
Presentación escrita (MB-B-R-M-MM)			
Presentación oral (MB-B-R-M-MM)			
Complejidad técnica (MB-B-R-M-MM)			
Metodología empleada (MB-B-R-M-MM)			
Resultados obtenidos (MB-B-R-M-MM)			
Esfuerzo realizado (MB-B-R-M-MM)			

### CALIFICACIÓN FINAL DEL PROYECTO

	SB / NOT / AP / SS / NP
(nota numérica)	Enmarcar la calificación alcanzada

PROYECTO PROPUESTO PARA MATRÍCULA DE HONOR: SÍ / NO  
(sólo si la nota numérica final es igual a 10)

Fuenlabrada, 8 de Julio de 2010

El Presidente

El Vocal

El Secretario



# Agradecimientos

*Parecía que esto no se iba a acabar, vaya últimas semanas. Parece mentira que este sea el tercero, ya tendría que saber cómo va esto, pero no, parece que no puedo vivir sin la adrenalina de entregar a última hora. Y, sin embargo, ya está, se acabó. Ahora ya sólo quedan los agradecimientos, que es lo más me gusta, porque me acuerdo de todos aquellos que hacen posible que siga creciendo. Porque al final escribir estos agradecimientos implica que se acaba una etapa y toca reflexionar sobre lo pasado en ella, y de eso lo mejor seguís siendo vosotros: las personas que durante esta etapa he conocido y las que ya conocía pero que me han permitido seguirles acompañando en las suyas.*

*El protocolo marca que empiece los agradecimientos por el director, pero en este caso, con protocolo o sin él sería injusto hacerlo de otra manera. Gracias Javier por la confianza, los consejos, el respeto, los valores, y por estar ahí para lo laboral y lo personal. Empecé esta etapa con un jefe, y la terminé con un amigo.*

*Si seguimos el orden, tocaría agradecerles a Antonio y a Carlos porque, aunque no aparezcan en ningún papel, gran parte de este trabajo se debe a ellos y a las reuniones multidisciplinares a primera hora de la mañana.*

*No puedo no agradecer a la Fundación EHAS por todo lo que implica para mí. Por proporcionar el marco de todo esto y por servir de motivación todos los días; por mostrar el camino de que los ceros y los unos pueden servir para conseguir un mundo mejor; por permitirme creer que ojalá algún día nos tengamos que dedicar a otra cosa, porque lo que hacemos no sea necesario. Y la Fundación la forman personas a las que también tengo mucho que agradecer. A Nacho, por hacer que me levante todos los días con la aspiración de parecerme un poquito más a él. A Ángela, por hacer la vida más fácil y agradable a los demás sin hacer ruido. A Andrés, por darme visión con perspectiva y consejos oportunos. A Inés, por permitirme conocer el Napo y la gente que hace que este trabajo merezca a pena. A Joaquín, por ser ejemplo de humildad. Y a la gente del otro lado del charco, por mostrarme que hay mil formas de hacer las cosas, y no la más rápida es la mejor.*

*Al departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, por apostar por mí y permitirme la libertad de crecer sin ataduras.*

*Y basta ya de lo laboral, que si algo he aprendido en esta etapa es que tiene que a ver tiempo para uno, y yo no puedo ser yo sin vosotros. A Prune, por aguantar, porque si hasta ahora ha sido genial, imagínate lo que nos queda por delante. A mis padres por la libertad de dejarme ser como soy, y a los abuelos por permitirles ser como son. Sin esa paz espiritual detrás sería difícil apuntar a metas más altas. A Jorge y Virginia, por el ejemplo de que nunca es tarde para arriesgar, ni para luchar por un futuro mejor. A la gente de Toledo y de Madrid por el espacio, el respeto y la comprensión y por dejar siempre la puerta abierta para recuperar el tiempo perdido. A Paco, por contagiarme de su energía y permitirme compartir sus ocios, y a Jose, por enseñarme que la vida está llena de ritmos; y a todos los demás habituales, en especial a Fer y a Juanjo, por los buenos ratos dentro y fuera de la casa patera. Y a toda la gente genial que he tenido la suerte de encontrar en esta etapa: Patxi, Juanma, Amagoia, Marina, Nydia, Marga, Ale, Elsa, Rico, etc. Y a todos los que sabéis que haríais que esta lista fuera más larga que el resto del documento.*

*Lo dicho, quiero que estos agradecimientos, y por lo tanto el final de esta etapa, signifiquen el comienzo de una nueva, en la que estaría más que agradecido si pudiera acompañaros.*

No hay medida que pueda abarcar todo lo que se vuelve posible para la gente que se ha puesto a poder

Mario Benedetti



# Resumen

Pese a que varios estudios han demostrado que las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) tienen un efecto multiplicador en el desarrollo humano, sigue habiendo multitud de regiones del planeta, fundamentalmente localizadas en países de bajos y medios ingresos, que no pueden beneficiarse de las ventajas que proporcionan. Entre los motivos que justifican dicha falta de acceso destacan la escasez de medios de sus gobiernos, que tienen problemas más acuciantes a los que hacer frente, y la falta de interés de las empresas de telecomunicaciones que no ven rentable invertir en zonas con escasa densidad de habitantes y cuya población se basa en una economía de subsistencia.

En este contexto, distintas organizaciones han investigado el desarrollo de tecnologías alternativas, apropiadas y de bajo costo para dotar de conectividad a colegios, centros de salud, ayuntamientos o telecentros de estas zonas y mejorar así la calidad de vida de sus habitantes. Una de las tecnologías consideradas para ello es WiMAX. Esta tecnología, que se basa en el estándar 802.16-2009, permite la operación, tanto en las bandas licenciadas como en las libres, de redes inalámbricas de largo alcance siguiendo una configuración punto a multipunto. Esta topología no se adapta correctamente a la dispersión de las poblaciones en estas zonas, ya que son necesarias muchas estaciones base para cubrir un área extensa, lo que encarece mucho su despliegue.

Buscar alternativas para abaratar el coste de despliegue de redes WiMAX era el objetivo general del proyecto Open Reach, proyecto financiado por el Ministerio de Industria que se desarrolló entre 2008 y 2010 y dentro del cual se enmarca el trabajo realizado dentro de este proyecto fin de máster. En concreto, se ha estudiado la viabilidad de presentar una propuesta para modificar la enmienda 802.16j para permitir su uso en la banda libre de 5 GHz. Esta enmienda al estándar 802.16-2009 define el uso de estaciones retransmisoras para ampliar la capacidad y la cobertura de redes que operen en bandas licenciadas.

En este estudio, por tanto, se ha realizado un análisis exhaustivo de los mecanismos y especificaciones descritas en la enmienda en busca de motivos que justificaran la limitación en el uso de esta tecnología a bandas licenciadas. Al no encontrar ningún motivo, se han analizado los requisitos establecidos por los marcos regulatorios internacionales para la operación en la banda no licenciada de 5 GHz para determinar si sería necesaria la inclusión de algún mecanismo adicional que permitiera el uso de retransmisores 16j en esta banda. Si bien es cierto que es necesario adaptar el mecanismo de Selección Dinámica de Frecuencias incluido en el estándar 802.16-2009 a la nueva estructura de red definida en la enmienda 802.16j, este hecho aumenta la complejidad, pero no condiciona la viabilidad técnica de la implementación de estaciones retransmisoras que operen en la banda de 5 GHz.

Además, se ha valorado la viabilidad industrial del desarrollo de este tipo de equipos. Para ello se ha consultado a gran parte del Grupo de Trabajo del IEEE que desarrolló la enmienda, a todos aquellos fabricantes que han indicado su interés en desarrollar equipos de este tipo y se ha acudido a la WiMAX Forum World Congress 2010. La conclusión obtenida es que un cúmulo de factores, entre los que destaca la aparición de LTE y la complejidad de los mecanismos definidos, ha provocado que el uso de estaciones retransmisoras en WiMAX según su definición en la enmienda 802.16j haya sido desestimado por la industria.

Por lo tanto, aunque el desarrollo de equipos retransmisores era técnicamente viable, los operadores no han considerado suficientes los beneficios que aportaban como para apostar por su fabricación en un momento tan delicado como el actual. Esto hace que carezca de sentido proponer una modificación a una enmienda que no va a ser desarrollada por ningún fabricante.



# Índice general

<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
1. Introducción	3
<b>2. WiMAX según el IEEE 802.16-2009</b>	<b>7</b>
2.1. Descripción del estándar 802.16-2009 . . . . .	7
2.2. Operación de WiMAX en bandas libres . . . . .	8
2.3. Definición de WiMAX móvil . . . . .	8
2.4. WiMAX móvil en banda libre . . . . .	9
<b>3. Beneficios teóricos de las distintas estrategias de retransmisión</b>	<b>11</b>
3.1. Introducción . . . . .	11
3.2. Fundamentos de la repetición: mejora de la SNR . . . . .	11
3.3. Configuraciones del repetidor a nivel físico: regeneración de la señal retransmitida . . . . .	13
3.4. Configuraciones del repetidor para la multiplexación de la señal retransmitida . . . . .	14
3.5. Repetición cooperativa . . . . .	17
3.6. El papel de los repetidores en niveles superiores . . . . .	18
<b>4. Introducción al estándar 802.16j</b>	<b>19</b>
4.1. Características físicas - Capa PHY . . . . .	19
4.2. Características lógicas - Capa MAC . . . . .	20
4.3. Estado del arte en investigación . . . . .	22
4.3.1. Aspectos clave del diseño de redes 802.16j . . . . .	23
4.3.2. Escenarios posibles para las redes 802.16j . . . . .	25
4.4. Conclusión . . . . .	26
<b>5. Objetivos</b>	<b>27</b>
<b>II. Metodología</b>	<b>29</b>
<b>6. Metodología</b>	<b>31</b>
6.1. Marco Regulatorio Internacional . . . . .	31
6.2. Consideraciones a la revisión de la enmienda IEEE 802.16j . . . . .	32
<b>III. Resultados</b>	<b>35</b>
<b>7. Descripción detallada de la enmienda IEEE 802.16j</b>	<b>37</b>
7.1. Inicialización de un nodo en la red . . . . .	38

## Índice general

7.1.1.	Escaneo del canal de bajada y obtención de los parámetros de recepción . . . . .	38
7.1.2.	Obtención de los parámetros de transmisión . . . . .	39
7.1.3.	Realización de alineamiento inicial y ajustes automáticos . . . . .	39
7.1.4.	Negociado de capacidades básicas . . . . .	42
7.1.5.	Autorización e intercambio de claves . . . . .	42
7.1.6.	Registro . . . . .	42
7.1.7.	Primera Fase de Selección de la Estación de Acceso . . . . .	43
7.1.8.	Segunda Fase de Selección de la Estación de Acceso . . . . .	43
7.1.9.	Creación de caminos y establecimiento de túneles . . . . .	43
7.1.10.	Configuración de los parámetros de operación de la RS . . . . .	44
7.1.11.	Gestión de las estaciones con conexión secundaria . . . . .	44
7.1.12.	Establecimiento de las conexiones aprovisionadas . . . . .	45
7.2.	Mecanismos de solicitud y gestión de ancho de banda . . . . .	45
7.2.1.	Solicitudes . . . . .	46
7.2.2.	Asignaciones . . . . .	52
7.3.	Estructuración de la QoS en redes multisalto . . . . .	53
7.3.1.	Flujos de Servicio . . . . .	54
7.3.2.	Establecimiento de conexiones de túneles . . . . .	55
7.3.3.	Servicios de planificación . . . . .	57
7.3.4.	Mecanismos para la provisión de QoS en redes multisalto . . . . .	61
7.4.	Soporte a la capa física dentro de la capa MAC . . . . .	63
7.4.1.	Estructura de la trama para el modo transparente . . . . .	65
7.4.2.	Estructura de la trama para el modo no transparente TTR . . . . .	67
7.4.3.	Estructura de la trama para el modo no transparente STR . . . . .	68
7.4.4.	Consideraciones en la estructura de las tramas . . . . .	69
7.4.5.	Estructura de los mensajes que componen las subtramas de control . . . . .	71
7.4.6.	Códigos CDMA en sistemas retransmisores . . . . .	72
7.4.7.	Retransmisión Cooperativa . . . . .	72
7.5.	Mecanismos adicionales de la capa MAC . . . . .	73
7.5.1.	Establecimiento de rutas . . . . .	73
7.5.2.	Retransmisión de MAC PDU . . . . .	74
7.5.3.	Alineamiento Periódico . . . . .	77
7.5.4.	Control de Potencia Transmitida . . . . .	77
7.5.5.	Preámbulos y R-ámbulos . . . . .	78
7.5.6.	Descubrimiento de la vecindad por la RS . . . . .	80
7.5.7.	Medición de las interferencias en Redes Multisalto . . . . .	81
7.5.8.	Baja de una RS en la red . . . . .	83
7.5.9.	Información de la ubicación de las estaciones . . . . .	83
7.6.	Conclusión . . . . .	83
<b>8.</b>	<b>Marco Regulatorio Internacional en la banda de 5 GHz</b>	<b>85</b>
8.1.	Selección Dinámica de Frecuencias . . . . .	85
8.2.	Control de Potencia Transmitida . . . . .	88
8.3.	Límites en la potencia máxima radiada . . . . .	89
8.3.1.	Máscara de transmisión . . . . .	91
<b>9.</b>	<b>Viabilidad técnica de operación en bandas libres de redes WiMAX multisalto</b>	<b>93</b>
9.1.	Mecanismos definidos en 802.16-2009 para adaptarse a la legislación en bandas libres . . . . .	93

9.1.1.	Selección Dinámica de Frecuencias . . . . .	93
9.1.2.	Control de Potencia Transmitida . . . . .	96
9.1.3.	Límites en la potencia máxima radiada . . . . .	96
9.2.	Viabilidad de implementar estos mecanismos en redes multisalto . . . . .	96
9.2.1.	Selección Dinámica de Frecuencias . . . . .	96
9.2.2.	Control de Potencia de Transmisión . . . . .	98
9.2.3.	Límites en la potencia máxima radiada . . . . .	98
9.3.	Conclusión . . . . .	98
<b>10.</b>	<b>Especificaciones de diseño de cada modo de operación</b>	<b>99</b>
10.1.	Inicialización . . . . .	100
10.1.1.	MR-BS . . . . .	100
10.1.2.	RS-NTd . . . . .	101
10.1.3.	RS-NTc . . . . .	102
10.1.4.	RS-T . . . . .	103
10.2.	Solicitudes y Asignaciones . . . . .	104
10.2.1.	MR-BS . . . . .	104
10.2.2.	RS-NTd . . . . .	105
10.2.3.	RS-NTc . . . . .	106
10.2.4.	RS-T . . . . .	106
10.3.	Provisión de QoS . . . . .	106
10.3.1.	MR-BS . . . . .	106
10.3.2.	RS-NTd . . . . .	108
10.3.3.	RS-NTc . . . . .	109
10.3.4.	RS-T . . . . .	109
10.4.	Soporte en capa PHY . . . . .	110
10.4.1.	MR-BS . . . . .	110
10.4.2.	Transparente . . . . .	111
10.4.3.	RS-NT . . . . .	111
10.5.	Mecanismos Adicionales de la capa MAC . . . . .	112
10.6.	Conclusión . . . . .	114
<b>11.</b>	<b>Viabilidad industrial de equipos retransmisores en bandas libres</b>	<b>117</b>
11.1.	Ecosistema WiMAX . . . . .	118
11.2.	Industria 16j . . . . .	120
11.3.	Alternativas para la implementación de esquemas de retransmisión en WiMAX . . . . .	121
11.4.	Conclusión . . . . .	122
<b>IV.</b>	<b>Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>123</b>
<b>12.</b>	<b>Conclusión</b>	<b>125</b>
12.1.	Trabajos Futuros . . . . .	126

*Índice general*

# Índice de figuras

1.1. Ejemplo de las distintas brechas existentes. . . . .	4
3.1. Sistemas con y sin repetición. . . . .	12
3.2. Dos alternativas para la transmisión en un enlace con cuatro saltos. . . . .	16
3.3. Ejemplo de topología para una red con varios saltos de repetición. . . . .	18
4.1. Formato de trama del modo no transparente (Dos saltos). . . . .	20
4.2. Formato de trama del modo no transparente (Múltiples saltos). . . . .	21
4.3. Ejemplo de tunelado de identificadores de conexión (T-CID). . . . .	21
6.1. Ejemplo estructura de la enmienda. . . . .	33
7.1. Cabecera de petición de ancho de banda. . . . .	46
7.2. Formato de la Subcabecera de Gestión de Asignaciones. . . . .	47
7.3. Estructura de la Cabecera Tunnel BR. . . . .	48
7.4. Estructura de la Cabecera RS BR. . . . .	49
7.5. Sondeos en redes multisalto. . . . .	50
7.6. Planificación de solicitudes en modo distribuido. . . . .	52
7.7. Planificación de asignaciones en modo distribuido. . . . .	53
7.8. Estructura de la Subcabecera de QoS. . . . .	57
7.9. Ejemplo de agregación de parámetros de QoS en un túnel. . . . .	63
7.10. Estructura de la trama para el modo transparente. . . . .	65
7.11. Estructura de la trama para el modo transparente con subcanalización en el UL. . . . .	66
7.12. Estructura de la trama para el modo no transparente TTR. . . . .	67
7.13. Estructura de la trama para el modo no transparente TTR con el DL subdividido. . . . .	68
7.14. Estructura de la trama para el modo no transparente TTR con el UL subcanalizado. . . . .	69
7.15. Estructura de la trama del modo no transparente STR compatible con el modo TTR. . . . .	70
7.16. Estructura de la trama del modo no transparente STR no compatible con el modo TTR. . . . .	70
7.17. Métodos embebidos de señalización de caminos. . . . .	73
7.18. Estructura de la Subcabecera de Asignaciones (Allocation Subheader). . . . .	75
7.19. Estructura del DL Allocation Reference IE. . . . .	76
7.20. Estructura del UL Burst Receive IE. . . . .	76
7.21. Ejemplo de sincronización mediante R-ámbulo. . . . .	79
7.22. Ejemplo de monitorización y sincronización conjunta. . . . .	80
7.23. Ejemplo de esquemas pre-planificado de transmisión y monitorización de R-ámbulo. . . . .	81
8.1. Servicios en la banda de 5GHz. . . . .	86
8.2. Máscara de transmisión europea en la banda de 5GHz para un canal de 20 MHz. . . . .	91
9.1. Máscara de transmisión definida en WiMAX para la banda de 5GHz. . . . .	97

*Índice de figuras*

# Índice de cuadros

3.1. Comparación de la capacidad obtenida para sistemas con y sin repetición. . . . .	15
7.1. Precisión requerida en función del tamaño del escalón $m$ . . . . .	77
8.1. Valores de los parámetros DFS . . . . .	87
8.2. Valores del Interference Detection Threshold . . . . .	88
8.3. Limitaciones de la ITU para la operación en la banda 5470-5570 MHz. . . . .	89
8.4. Densidad Espectral de PIRE en función del ángulo de elevación. . . . .	90
8.5. Limitaciones de la CEPT para la operación en las bandas 5150-5350 y 5470-5725 MHz. . . . .	90
8.6. Limitaciones de la FCC para la operación en las bandas de 5 a 6 GHz. . . . .	90
9.1. Distintas nomenclaturas para la selección dinámica de frecuencias. . . . .	96
11.1. Número de despliegues WiMAX por región. . . . .	117
11.2. Despliegues según frecuencia de operación. . . . .	118

*Índice de cuadros*

# Acrónimos

<b>AAS</b>	Adaptive Antenna System
<b>AF</b>	Amplificación y Reenvío
<b>BE</b>	Best Effort
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BR</b>	Bandwidth Request
<b>BS</b>	Base Station
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CEPT</b>	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones
<b>CID</b>	Connection Identifier
<b>CINR</b>	Carrier-to-Interference-and-Noise Ratio
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>CS</b>	Convergence Sublayer
<b>DF</b>	Decodificación y Reenvío
<b>DFS</b>	Dynamic Frequency Selection
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>DL</b>	Downlink
<b>DSCP</b>	Differentiated Services Code Point
<b>ECC</b>	Comité Comunicaciones Electrónicas
<b>ERC</b>	Comité Europeo de Radiocomunicaciones
<b>FCC</b>	Comité Federal de Comunicaciones
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat Request
<b>IE</b>	Information Element
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MR-BS</b>	Multihop Relay Base Station
<b>MRC</b>	Maximum Ratio Combining
<b>MS</b>	Mobile Station
<b>nrtPS</b>	non-real-time Polling Service
<b>NTIA</b>	Administración Nacional de Información y Telecomunicaciones
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PIRE</b>	Potencia Isotópica Radiada Equivalente
<b>PM</b>	Poll-me bit

## *Índice de cuadros*

<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RS</b>	Relay Station
<b>RSRTG</b>	RS Receive/Transmit Transition Gap
<b>RSSI</b>	Receive Signal Strength Indicator
<b>RSTTG</b>	RS Transmit/Receive Transition Gap
<b>RTG</b>	Receive/Transmit Transition Gap
<b>rtPS</b>	real-time Polling Service
<b>SC</b>	Selection Combining
<b>SFID</b>	Service Flow Identifier
<b>SI</b>	Slip Indicator
<b>SS</b>	Subscriber Station
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>STR</b>	Simultaneous Transmit and Receive
<b>TDD</b>	Duplexación por división en tiempo
<b>TFTP</b>	Trivial File Transfer Protocol
<b>TID</b>	Transaction Identifier
<b>TLV</b>	Type/Length/Value
<b>TTG</b>	Transmit/Receive Transition Gap
<b>TTR</b>	Time-division Transmit and Receive
<b>UGS</b>	Unsolicited Grant Service
<b>UL</b>	Uplink
<b>V2I</b>	Vehículo a Infraestructura
<b>V2V</b>	Vehículo a Vehículo
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WiMAX</b>	World Interoperability for Microwave Access

**Parte I**

**Introducción**



# 1 Introducción

La Conferencia Mundial de la Sociedad de la Información mantenida en 2005, en Túnez [1], concluyó que era necesario "*crear mayor conciencia acerca de las ventajas que las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) pueden aportar a la humanidad y de la manera en que pueden transformar las actividades y la vida de las personas, así como su interacción, despertando así una mayor confianza en el futuro*". Distintas investigaciones han corroborado la visión de que las TIC son una herramienta para ampliar las oportunidades para el desarrollo social y económico de un país [2, 3, 4, 5]. En concreto, en un estudio realizado por el Banco Mundial se demostró que un aumento del 10 % en la penetración de los servicios de banda ancha supone un crecimiento del 1.4 % en el Producto Interior Bruto (P.I.B.) de los países en desarrollo [5].

Comenzar a considerar las TIC como el motor del desarrollo local ha favorecido que distintos gobiernos basen sus estrategias para fomentar su desarrollo en las TIC, como es el caso de Ruanda [6]. Este hecho, unido a la búsqueda de nuevos mercados de las grandes operadoras multinacionales de telecomunicaciones, ha propiciado que en los últimos años se produzca un incremento significativo de las posibilidades de acceso a las TIC en los países en desarrollo, fundamentalmente con la llegada del cable submarino a la costa este africana [7], y el crecimiento en la penetración de la telefonía móvil [8].

Sin embargo, en la actualidad, según las estimaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), los habitantes de 800.000 poblaciones en el mundo, un 30 % del total, no pueden realizar una simple llamada telefónica [9]. A esto hay que añadir que 5.500 millones de personas no tienen acceso a un ordenador y por ende a Internet [10]. Pero estas diferencias no están únicamente referidas al acceso, si no también a la calidad. A nivel mundial, se ha cuantificado que los habitantes de países de altos ingresos, 942 millones, disfrutan de 5 veces mejor acceso a servicios de telefonía tanto fijo como móvil y 9 veces mejor acceso a Internet que el 85 % de la población mundial, aquellos que viven en países de bajos o medios ingresos.

Parece, por lo tanto, que existe una gran diferencia en las posibilidades de acceso de calidad a las TIC, y a los beneficios que proporcionan. A esta diferencia se le denomina internacionalmente "brecha digital". Aunque este concepto habitualmente hace referencia a las diferencias entre países (brecha digital internacional), existe también una gran diferencia en las posibilidades de acceso dentro de cada país (brecha digital nacional) que hace referencia fundamentalmente al acceso desigual entre poblaciones rurales y urbanas, entre ricos y pobres [11].

Para tratar de disminuir esta brecha hay que tener en cuenta las características específicas de poblaciones rurales y aisladas de países en desarrollo [12]:

- Las vías de acceso a estos lugares son deficientes, y en muchos casos inexistentes, al igual que la infraestructura eléctrica. Esto dificulta y encarece el despliegue y el mantenimiento de las tecnologías de comunicaciones que se quieran utilizar.
- La población se localiza en comunidades dispersas a lo largo y ancho de grandes superficies de terreno, alcanzando niveles de densidad de habitantes por kilómetro cuadrado cercanos a cero.
- Dicha población se basa en una economía de subsistencia que impide que puedan hacer frente a costes relacionados con el acceso a las TIC.



Figura 1.1: Ejemplo de las distintas brechas existentes.

- Es muy complicado encontrar personal técnico cualificado local para llevar a cabo las tareas de mantenimiento y operación de las tecnologías que se quieran utilizar.

Estos condicionantes hacen que las empresas no encuentren atractivo el despliegue de infraestructura de comunicaciones en estas zonas, puesto que no ven viable obtener retorno de inversión sobre los mismos. Tampoco los estados de los países en vías de desarrollo están en condiciones de poder subvencionar la instalación de redes de comunicaciones rurales en pro de la cobertura total, tanto por su falta de recursos como por la enorme proporción que las poblaciones rurales no contributivas representan en el total. Esto queda reflejado en la Figura 1.1. Donde se muestra que existe una gran cantidad de población cuya cobertura nunca será sostenible para el mercado.

Para que las poblaciones ubicadas en estos contextos puedan beneficiarse de las oportunidades que ofrecen las TIC para mejorar los procesos de salud, los educativos o los de gobierno, distintos agentes están haciendo uso de recursos de cooperación internacional para financiar los elevados costes de infraestructura para luego establecer mecanismos para que los gobiernos locales se hagan cargo de las mismas [13]. Estos agentes, a la hora de buscar soluciones que se pretendan aplicar de forma sostenible han de considerar las especificaciones tecnológicas derivadas de las condiciones de contorno impuestas por las características de estas zonas [14]:

- Han de ser fáciles de usar, ya que los potenciales usuarios no han tenido, en muchos casos, contacto previo con ninguna tecnología de comunicaciones.
- Han de ser robustas y requerir poco o ningún mantenimiento, ya que es difícil encontrar técnicos especializados en la zona.
- Deben ser de bajo consumo, puesto que ante la falta de infraestructura eléctrica, dicha tecnología tendrá que ser alimentada, en muchos casos, mediante energía fotovoltaica o eólica, lo que encarece las instalaciones y aumenta las necesidades y costes de mantenimiento.
- Solución estándar e interoperable entre los equipos de distintos fabricantes...

- Deben tener costes de despliegue y de operación muy bajos. Esto excluye<sup>1</sup>:
  - Las redes cableadas que requieren de altos costes de instalación, ya que si no existe cableado hay que realizar la obra civil apropiada. Además, requieren de centrales de conmutación relativamente grandes.
  - Las de telefonía móvil, ya que al emplear espectro regulado, requieren la adquisición de licencias de operación. Además, el equipamiento de red, a diferencia del de usuario, tiene un coste muy elevado
  - Las redes satélite dados sus importantes costes de operación.

Una de las alternativas que cumple con la mayoría de estos requisitos es la tecnología WiFi, derivada de la familia de estándares 802.11. Entre sus mayores ventajas destaca que su funcionamiento se enmarca dentro de las bandas de frecuencia que no requieren licencia de operación. Además, cuenta con una gran economía de escala, gracias, en parte, a la gran adopción que esta tecnología tiene en redes de área local de países desarrollados. Esto permite que exista una gran variedad de productos compatibles entre sí a muy bajo coste, pero a su vez requiere que se realicen ciertas modificaciones en su funcionamiento para realizar enlaces de decenas de kilómetros [14]. A esta tecnología se la conoce como WiLD (WiFi for Long Distances) y ha sido utilizada en multitud de proyectos para dotar de conectividad a zonas rurales y aisladas del planeta [15, 16, 17, 18, 19]. Sin embargo, el hecho de no haber sido diseñada para este tipo de aplicaciones hace que tenga algunas limitaciones. En concreto, no permite garantizar recursos de forma estricta a los servicios que van sobre ella, lo que puede impedir, en un momento dado, que los servicios implementados para ser transportados por dicha red no se comporten correctamente debido a la falta de recursos.

Otra alternativa que, si bien es cierto que el consumo de sus equipos es ligeramente superior, cumple con la mayoría de estos requisitos es WiMAX, basada en la familia de estándares 802.16. En su concepción fue principalmente diseñada para ofrecer una alternativa inalámbrica al acceso de última milla, permitiendo comunicaciones de varias decenas de kilómetros haciendo uso tanto de bandas de frecuencias licenciadas como libres. Además, es una tecnología diseñada para ser puesta en práctica por un operador lo que implica que cuenta con una gran robustez y posibilidad de gestionar al detalle la calidad de servicio de las comunicaciones que por ella se produzcan.

Pese a que diversos autores han señalado que esta tecnología está llamada a ser la solución de los problemas de acceso a las TIC de los países en desarrollo [11, 20], hay dos factores que limitan la puesta en práctica de esta tecnología. El primero es que WiMAX es conocido en muchos ámbitos por la lucha que está manteniendo con Long Term Evolution (LTE), la evolución natural de las redes 3G, por hacerse con el control de la banda ancha móvil en países desarrollados. Esto hace que muchas instituciones que podrían hacer uso de sus ventajas para dar cobertura a zonas rurales de países en desarrollo desconozcan sus beneficios, entre ellos, que puede operar en bandas no licenciadas y que existen multitud de equipos en el mercado que lo posibilitan. El segundo es que la topología básica de funcionamiento de WiMAX no está adaptada a la distribución de las poblaciones en áreas rurales de países en desarrollo. Ésta se basa en un estación central que gestiona el acceso al medio radioeléctrico de los usuarios dentro de su área de cobertura. Este hecho implica que para cubrir grandes zonas de territorio con usuarios dispersos se necesitaría un número muy elevado de estaciones base, lo que hace que WiMAX no cubra el escalón de costo y flexibilidad que actualmente cubre WiFi adaptado para largas distancias.

Surge por tanto la necesidad de estudiar diferentes estrategias para aumentar la cobertura de redes WiMAX operando en bandas no licenciadas para extender su conectividad en áreas rurales de países en desarrollo al menor coste posible. Este era el Objetivo General del Proyecto Open Reach, proyecto

---

<sup>1</sup>Sin embargo, en ocasiones se puede plantear el acceso a Internet de toda una red por estos medios, pero la distribución del acceso se tendrá que hacer con una tecnología complementaria más barata.

financiado por el Ministerio de Industria desarrollado entre 2008 y 2010, y dentro del cual se ha llevado a cabo este trabajo de fin de máster. En concreto, en este proyecto se pretende realizar un estudio de topologías de red alternativas al planteamiento básico en estrella de las comunicaciones punto a multipunto, donde las estaciones base sirven directamente a las estaciones suscriptoras. Dentro del marco del Open Reach también se han analizado otras estrategias de reducción de costes como la implementación de un equipo híbrido WiFi-WiMAX o el desarrollo de una herramienta de simulación de redes heterogéneas inalámbricas.

En una primera fase de este proyecto se realizó un análisis en profundidad del modo Mesh de 802.16-2004 [21], quedando patentes las lagunas que presentaba el estándar en su definición y las numerosas pegas puestas de relieve al estudiar su viabilidad industrial. El resultado negativo de este análisis fue avalado por la decisión del WG IEEE 802.16 al retirar el modo Mesh del estándar en la revisión del mismo 802.16-2009, publicada en Mayo [22].

Sin embargo, en una segunda fase se planteaban opciones de “repetición” y “retransmisión”, y en esto ha sucedido lo contrario: el IEEE ha publicado en Junio de 2009 una nueva enmienda al estándar llamada IEEE 802.16j [23] en que se introduce la figura de la “Relay Station”, dándose una cierta cantidad de opciones funcionales que vienen a cubrir conceptualmente lo que se pretendía hacer. Esto ha influido de manera determinante en la forma de abordar este trabajo, pues ya no necesariamente se trata de plantear alternativas de extensión de la cobertura totalmente ajenas al estándar.

Una primera lectura del estándar 802.16j permite ver que, de manera implícita, se asume el uso de lo que se suele llamar “WiMAX móvil” en bandas licenciadas. En este proyecto, sin embargo, se plantea de forma determinante el uso del estándar 802.16 en su modo fijo y en banda libre de 5GHz (5,6-5,8 GHz en Europa, 5,8 GHz en América). Ante esta primera divergencia, cabe estudiar a fondo si lo que el estándar propone tiene sentido en este marco y para escenarios rurales.

## 2 WiMAX según el IEEE 802.16-2009

El estándar IEEE 802.16-2009 [22], ratificado en Mayo de 2009, revisa y consolida las versiones anteriores del estándar: 802.16-2001, 802.16a-2003, 802.16c-2002, 802.16-2004 y 802.16e-2005, 802.16f, y 802.16g, además de añadir alguna funcionalidad adicional. Cabe señalar que el nombre WiMAX, por el que esta tecnología es ampliamente conocida, no se refiere a la tecnología en sí misma, si no al nombre del certificado de interoperabilidad que reciben los equipos que cumplen con las especificaciones definidas en el estándar 802.16-2009. En concreto, el nombre WiMAX proviene de “*Worldwide Interoperability for Microwave Access*”. Pese a que es importante conocer esta diferencia, en este proyecto se usan ambos términos indistintamente.

### 2.1. Descripción del estándar 802.16-2009

El estándar define una capa de control de acceso al medio (MAC) especialmente diseñada para la modalidad de punto a multipunto (una estación base (BS) gestiona a varios clientes (SS)). Esta capa ha sido estructurada para acomodar distintos tipos de interfaces físicas (PHY) que permiten la operación tanto con línea de vista, como sin ella para un amplio espectro de frecuencias electromagnéticas (hasta 66 GHz). El estándar define tres posibles PHY basadas en modulación monoportadora, OFDM y OFDMA y denominadas *WirelessMAN-SCa*, *WirelessMAN-OFDM* y *WirelessMAN-OFDMA*, respectivamente. Además, el estándar también define la operación en bandas que no requieren licencia en frecuencias inferiores a 11 GHz. Esta PHY recibe el nombre de *Wireless-HUMAN*, y en ella se puede utilizar tanto OFDM, como OFDMA.

WiMAX basa su funcionamiento en un esquema de acceso múltiple por división en tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access), es decir, se realiza una planificación detallada del momento en el que transmite cada sistema dentro de la red, para que no se produzcan interferencias entre ellos. Para dar mayor flexibilidad en el uso del espectro se permite la utilización de dos técnicas de duplexado para diferenciar entre las transmisiones en el Uplink (hacia la BS) y en el Downlink (desde la BS): multiplexación en el tiempo (TDD, Time Division Duplex) y multiplexación en frecuencia (FDD, Frequency Division Duplex). Sin embargo, únicamente la primera está permitida para la operación en bandas no licenciadas.

Otra de las características del estándar 802.16-2009 es que permite la utilización de modulaciones adaptativas, es decir, que proporciona los mecanismos necesarios para que las estaciones puedan cambiar el esquema de modulación utilizado en la transmisión de forma dinámica en función del estado del canal inalámbrico en cada momento. A todas estas características hay que añadir la calidad de servicio (QoS). En WiMAX la capa MAC está orientada a conexión y la provisión de QoS se realiza a través de un mecanismo denominado *Grant/Request*, donde las SS solicitan el ancho de banda que necesitan (*Request*) para cada conexión y la BS decide, en función del ancho de banda disponible y las características de QoS de cada conexión, cuánto asigna a cada SS (*Grant*).

Además, el estándar propone el uso de otras técnicas más avanzadas para optimizar el uso del medio radioeléctrico y aumentar las prestaciones de la red. Algunas de ellas ya existían en la versión “fija” (802.16-2004), como la diversidad espacio temporal (STC), los sistemas de antenas adaptativas (AAS) y sistemas de entrada y salida múltiples (MIMO) para mejorar la cobertura, denominados MIMO A. Otras se incluyeron en la versión “móvil”, como la inclusión de un perfil de QoS que permite manejar mejor los

servicios de voz, la definición de un sistema de ARQ híbrido (HARQ) y de turbo códigos convolucionales que permiten ampliar la cobertura o la descripción de un nuevo sistema MIMO, denominado MIMO B, para aumentar la capacidad de las redes [24]. Además, en el estándar 802.16-2009 se definen nuevos mecanismos como el balance de carga, la compresión robusta de cabeceras o mecanismos avanzados de asignación de recursos [25].

## 2.2. Operación de WiMAX en bandas libres

Como se indicó en la introducción, WiMAX se puede ver como una alternativa para llevar banda ancha a los lugares más apartados, pero la política de licencias de operación en las bandas de frecuencias para las que hay perfiles de certificación hace no rentable para los operadores la inversión de crear esta clase de infraestructuras en zonas con población poco densa y muy dispersa. En este sentido, abundan los escenarios en que interesan las soluciones basadas en IEEE 802.16-2009 pero en bandas no licenciadas (5 a 6 GHz dependiendo del país). Estas soluciones, aunque sean compatibles con el estándar e incluso interoperables entre sí, no pueden ponerse por ahora el sello WiMAX sólo porque no existe un perfil de certificación del WiMAX Forum para esas frecuencias. En todo caso, eso no es más que un formalismo si la interoperabilidad sí está garantizada. Por lo que, aunque en sentido estricto no sea correcto, hablaremos a lo largo del documento de WiMAX en bandas libres.

La operación de WiMAX en bandas libres se ha visto muy beneficiada con la aparición del estándar 802.16-2009, ya que la integración de los estándares “fijo” y “móvil” posibilita el diseño de equipos basados en 802.16e para el uso en bandas libres, algo que ya están aprovechando algunos fabricantes [26]. Esto permite que las redes que basen su funcionamiento en bandas no licenciadas podrán sacar provecho de la posibilidad de utilizar las técnicas de mejora de las prestaciones descritas anteriormente para WiMAX “móvil”.

Además, existe un grupo de trabajo muy activo dentro del grupo 802.16 que está trabajando de forma muy activa en los últimos meses para mejorar la coexistencia de redes WiMAX en bandas libres de frecuencia. Esta especificación se está desarrollando dentro del grupo de trabajo 802.16h y tiene previsto ver la luz en los próximos meses [27].

## 2.3. Definición de WiMAX móvil

El término “WiMAX móvil” no es un término oficial que designe algo concreto. De hecho, la palabra “WiMAX” no aparece prácticamente en el estándar IEEE 802.16, y menos aún seguida de la palabra “móvil”. Se puede decir que “WiMAX móvil” es un término creado por la industria y con un significado poco preciso. Las estaciones móviles en el estándar fueron introducidas en la enmienda IEEE 802.16e-2005, pero ya se ha publicado una revisión del estándar completo que integra todo el estándar en un mismo documento: IEEE 802.16-2009, que incluye soporte para usuarios tanto fijos como móviles, e incluso contempla backhaul en alta frecuencia.

Por lo general hay dos aspectos que toda tecnología denominada “móvil” suele cumplir:

- Las aplicaciones móviles requieren terminales portátiles tipo PDA o USB, con antenas omnidireccionales de reducidas dimensiones y poca ganancia, alimentados por una pequeña batería de forma que puedan ser transportados por una persona.
- La tecnología debe soportar “soft hand-off”. El término “hand-off” (o “hand-over”) significa que un terminal pase de la zona de cobertura de una estación base a la zona de cobertura de otra estación base. Que sea “soft” implica que se mantiene la conectividad durante ese proceso de cambio de

estación base, pasando totalmente desapercibido para el usuario. De este modo, una comunicación de voz no cae aunque el usuario se desplace. En contraposición al soft hand-off está el “hard” hand-off, en el que la conexión cae durante un instante que puede ir desde un tiempo inferior a un segundo hasta varios segundos o minutos, en cualquier caso no válido para aplicaciones de voz en movilidad.

Estas funcionalidades están recogidas en el estándar 802.16 en su versión actual.

Pese a que habitualmente no se consideran aplicaciones móviles, también lo son aquellas que suceden desde vehículos a una infraestructura fija (V2I) o a otros vehículos (V2V) en las que se podría contar con antenas de mayor ganancia e independencia en cuanto a la duración de la batería.

## 2.4. WiMAX móvil en banda libre

El término WiMAX móvil, entendido como el que necesita un dispositivo que transporta un humano, entra en contradicción con la operación en bandas libres, dado que es muy complicado a que las aplicaciones móviles sean viables en bandas libres, o dicho de otra forma, sean sólo aplicables a bandas licenciadas. Técnicamente es poco viable soportar aplicaciones móviles en bandas de frecuencia que no requieran frecuencia ya que:

1. **La posibilidad de transmitir alta potencia está restringida a bandas licenciadas.** En la actualidad, las bandas libres están restringidas en potencia de transmisión, como se verá en más detalle en el capítulo 8, y es ilegal transmitir por encima de éstas.
2. **Las aplicaciones móviles requieren terminales pequeños y compactos, tipo USB o PDA.** El uso de este tipo de terminales no es una opción, sino una consecuencia inevitable de las aplicaciones de movilidad. No tiene sentido una aplicación de movilidad con terminales que deben estar amarrados a un mástil o a una pared como los utilizados en aplicaciones fijas.
3. **El uso de terminales pequeños y compactos aumenta notablemente las pérdidas de propagación.** Esto se debe a tres motivos:
  - Los terminales USB/PDA deben poder emplearse en interiores, por lo que la señal debe penetrar al interior de edificios atravesando paredes, lo que aumenta las pérdidas de propagación.
  - La antena de los terminales USB/PDA es omnidireccional y de baja ganancia, por lo su aporte al balance de enlace es muy pequeño.
  - Los terminales USB/PDA suelen ser alimentados por batería, por lo que su consumo limita la potencia de transmisión.
4. **Las altas pérdidas de propagación asociada al uso de terminales USB/PDA requiere emplear estaciones base de alta potencia.** Para permitir una comunicación con una mínima calidad, las enormes pérdidas de propagación asociada al uso de estos terminales debe ser compensada en ambos sentidos, en sentido ascendente (comunicación entre el terminal de usuario y la estación base) y en sentido descendente (entre la estación base y el terminal de usuario). Para compensar las pérdidas en sentido ascendente, es necesario emplear un mecanismo de acceso múltiple que no sea TDMA, como es el caso de WiMAX móvil (OFDMA) o 3G (CDMA). En sentido descendente la única forma de compensar las pérdidas es mediante la transmisión con alta potencia desde la estación base.

Por todo lo anterior, y sin entrar en un análisis de viabilidad comercial, se puede ver que las aplicaciones móviles, tal y como las conocemos hoy, simplemente no son técnicamente viables en estas bandas.

En bandas libres la potencia que se puede transmitir es baja, por lo que no hay estaciones base de alta potencia. Por alta potencia hablamos de potencias de transmisión de 2W o más<sup>1</sup>. El balance de enlace en sentido descendente no es suficiente para soportar el uso de terminales USB/PDA, por lo que es imprescindible emplear terminales de exterior con antena de alta ganancia. El uso de técnicas OFDMA o CDMA no aporta ventajas en este caso, ya que el alcance está limitado por el enlace descendente, en el que estas técnicas no intervienen para mejorar el balance de enlace.

Esto no aplica a las comunicaciones V2V o V2I, donde los vehículos podrían transportar antenas de mayor ganancia y cuyas radios podrían utilizar una mayor potencia debido a que se alimentarían a través de la energía producida por el vehículo. Por lo que el enlace, y con él, la cantidad de datos a intercambiar, sería mayor en ambos enlaces. El uso de bandas de frecuencias que no requieren licencia no sólo suponen un ahorro en coste al no tener que pagar por la licencia, si no que también permiten un despliegue rápido al no requerir, en muchos casos, realizar ningún trámite para transmitir en ellas. La combinación de estos dos factores permitiría utilizar este tipo de infraestructuras en escenarios donde se requiriera un despliegue rápido e involucrara la participación de vehículos. Esta es una de las características de las redes de comunicaciones que se despliegan después de un desastre natural y que sirven de apoyo para la coordinación de los equipos de rescate.

En definitiva, en bandas libres todo acaba convergiendo a un modelo idéntico al de las aplicaciones fijas: terminales outdoor con antena integrada e instalación en mástil o pared, y propagación con línea de vista (LOS), salvo que se trate de comunicaciones V2V o V2I muy específicas.

En el siguiente capítulo se presenta un estudio de los beneficios teóricos que ofrece la inclusión de repetidores en ambos escenarios.

---

<sup>1</sup>Nos referimos a potencia entregada a la antena, no potencia PIRE, que será mucho mayor

## 3 Beneficios teóricos de las distintas estrategias de retransmisión

### 3.1. Introducción

Los repetidores (“relays”) constituyen un elemento fundamental en multitud de sistemas de comunicaciones. Pueden encontrarse ejemplos de utilización de repetidores tanto en sistemas de comunicación primitivos (telégrafo óptico) como en sistemas modernos de última generación (e.g., 802.16j). Fundamentalmente, los repetidores se han utilizado como un elemento para incrementar el alcance (cobertura) del enlace inalámbrico. Dos han sido los escenarios primarios de aplicación: ofrecer cobertura a zonas oscuras donde la señal no llegaba y conseguir comunicar puntos muy lejanos a través del uso de varios repetidores intermedios.

No obstante, el paso del tiempo ha revelado que, cuando se hacen más flexibles, los repetidores pueden ofrecer ventajas en múltiples niveles del proceso de comunicación. En la actualidad se propone el uso de repetidores para lograr, entre otros, los siguientes objetivos:

- Incremento de cobertura.
- Mejora de la capacidad de envío de información (a través del incremento de la tasa de información).
- Mejora de la fiabilidad del enlace (a través de la reducción de la probabilidad de error de bit).
- Mejorar la tolerancia a fallos del sistema mediante la introducción de redundancia.
- Mejorar la flexibilidad y capacidad de adaptación del sistema.

A continuación se analizarán en más detalle, haciendo especial hincapié en los aspectos relacionados con el nivel físico y las prestaciones básicas del canal de comunicación: relación señal a ruido (SNR), probabilidad de error de bit (BER) y velocidad (tasa) de transmisión. La última parte de esta sección se dedica a un breve análisis sobre el impacto de la inserción de repetidores en los niveles de enlace y red.

### 3.2. Fundamentos de la repetición: mejora de la SNR

Las leyes de propagación electromagnética establecen que, cuando se transmite una señal a través de un canal inalámbrico, la potencia disminuye cuando la distancia entre el transmisor y el receptor (vano) aumenta. Por otro lado, es evidente que si se coloca un terminal repetidor entre el transmisor y el receptor, el enlace de comunicación inicial se divide en dos enlaces (uno entre el transmisor y el repetidor y otro entre el repetidor y el receptor), cada uno de ellos con un vano menor que el del enlace inicial. Puesto que el vano es menor, la potencia recibida será mayor y la calidad de la recepción mejorará. No obstante, es evidente que la introducción de un elemento repetidor acarrea un coste, no sólo en términos económicos, sino también en complejidad del sistema, retardo o incremento de la señalización. Sin embargo, éstos costes no serán tratados en este capítulo al ser dependientes de la implementación que se realice. En él nos centraremos en estudiar con más detalle cuáles son las ventajas (ganancia de potencia) asociadas al uso del repetidor.

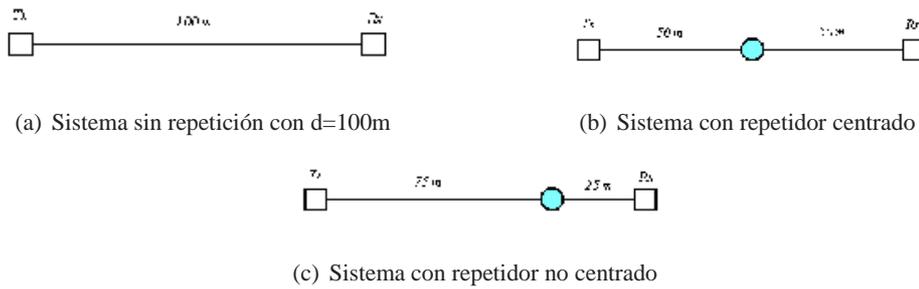


Figura 3.1: Sistemas con y sin repetición.

De forma más precisa, se sabe que si una señal electromagnética se propaga en canales inalámbricos, la potencia decae exponencialmente con la distancia. Si la propagación es ideal y se realiza en espacio libre la potencia recibida (denotada por  $P_{rx}$ ) es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del vano (denotada por  $d$ ). Podemos escribir por tanto que  $P_{rx} \propto d^{-2}$  (donde la notación  $x \propto y$  implica que  $x$  es proporcional a  $y$ ). En entornos de propagación no ideales se tiene que  $P_{rx} \propto d^{-\eta}$ , donde el parámetro  $\eta$  se conoce como coeficiente de pérdidas y su rango de valores típico es  $2 \leq \eta \leq 6$ . A modo de ejemplo, en sistemas móviles que operan en entornos urbanos típicamente  $\eta = 4$  [28].

Una vez introducida esta notación, estudiaremos un sencillo ejemplo que permitirá *cuantificar* las ganancias debidas a la inserción de un terminal repetidor. Considérese primero un sistema en el que no existe un repetidor (Figura 3.1(a)). En dicho sistema, el transmisor utiliza una potencia de transmisión fija, en el receptor existe un ruido cuya potencia viene determinada por el ancho de banda de la comunicación y se supone un entorno de propagación con  $\eta = 4$ . En estas condiciones el resto de parámetros del sistema (ganancia de las antenas, frecuencia de trabajo, etc.) es tal que la relación entre la potencia recibida y la potencia de ruido, es decir, la relación señal a ruido (SNR) en el receptor es  $\text{SNR}=5$ .

Considérese ahora la configuración del sistema de la Figura 3.1(b), donde se ha posicionado un repetidor en el punto medio de la recta que conecta al transmisor y receptor inicial. Puesto que el único parámetro que cambia es la distancia del vano, es evidente que la calidad de cada uno de los enlaces es mejor en este caso. En concreto, puesto que en el primer caso se tenía que las pérdidas eran proporcionales a  $d^4$  y ahora lo son a  $(d/2)^4$ , se puede concluir fácilmente que las pérdidas entre el transmisor y el repetidor son  $(1/2)^{-4} = 2^4 = 16$  veces menores y que, por tanto, la SNR para este enlace es 16 veces mayor que en el caso del enlace de la Figura 3.1(a). Puesto que el enlace entre el transmisor y el repetidor es semejante al enlace entre el repetidor y el receptor, puede concluirse que la calidad del segundo enlace es también 16 veces mayor que en el caso del enlace de la Figura 3.1(a).

Si analizamos ahora el esquema de la Figura 3.1(c) donde el repetidor no se sitúa en el punto medio, comprobaremos que la SNR sigue mejorando. En este caso las pérdidas del primer enlace serán  $(3/4)^{-4} = 256/81 = 3,1$  menores que cuando no existe repetidor, mientras que las pérdidas en el segundo enlace serán  $(1/4)^{-4} = 256$  menores. Comprobamos así como la calidad de la recepción mejora cuando se coloca un dispositivo repetidor. Esta afirmación es cierta para cualquier valor  $\eta$  del coeficiente de pérdidas, aunque la mejora será mayor cuanto más grande sea el valor de  $\eta$ . Esto supone que la introducción de elementos repetidores es especialmente recomendable en entornos de propagación adversos (por ejemplo, áreas urbanas, con presencia de obstáculos y movilidad).

El ejemplo anterior ha puesto de manifiesto también que la posición en la que se coloca el repetidor tiene un fuerte impacto en la calidad del enlace. Aunque este hecho requiere un estudio más riguroso, la conclusión básica es que la localización más adecuada para el repetidor es el punto medio entre transmisor y receptor. Si el repetidor no se coloca en el punto medio, las SNR de los enlaces serán distintas: una de ellas será mejor que para el caso en el que el repetidor se coloca en el punto medio y la otra

será peor. Puesto que las prestaciones (bien sean medidas en términos de SNR agregada o en términos de probabilidad de error agregada) de sistemas de comunicaciones conectados en cascada están siempre limitadas por el peor de los sistemas, el hecho de que las SNR sean asimétricas implica que la calidad del enlace estará dictada por el enlace con SNR más baja, que será siempre menor que la SNR del sistema con retransmisor colocado en el punto medio.

### 3.3. Configuraciones del repetidor a nivel físico: regeneración de la señal retransmitida

Desde el punto de vista de codificación y modulación, existen dos estrategias fundamentales de repetición:

- *Amplificación y reenvío (A-R)*. El repetidor amplifica la señal analógica recibida, lo que supone que se amplifica tanto la señal como el ruido. Es conceptualmente sencillo y ofrece buenas prestaciones (especialmente en canales con desvanecimientos, donde este esquema colecta toda la diversidad posible). Desde el punto de vista hardware, los requisitos de memoria pueden ser muy altos si el sistema opera en bloques temporales y la señal amplificada se transmite en un bloque posterior a cuando se ha recibido.
- *Decodificación y reenvío (D-R)*. El repetidor decodifica la señal recibida y la vuelve a codificar y transmitir. En general presenta mejores prestaciones de probabilidad de error y baja complejidad hardware. Sus desventajas son: (a) la señal retransmitida tiene que enviarse siempre después de haberse recibido la señal original, (b) si en la demodulación del enlace entre el transmisor y el repetidor se producen errores, esos errores se propagan al receptor y (c) en canales con desvanecimientos, el esquema puede perder diversidad<sup>1</sup>.

A continuación analizaremos las prestaciones en términos de BER que se obtienen para cada una de las estrategias anteriores. En primer lugar, considérese un esquema con repetición en el que la SNR entre el transmisor y el repetidor se denota como  $SNR_1$  y la SNR entre el repetidor y el receptor se denota como  $SNR_2$ . En segundo lugar, considérese la función  $Pe(SNR)$  que calcula la probabilidad de error de bit para una SNR determinada.

- Cuando se utiliza un esquema de amplificación y reenvío, puede demostrarse que la SNR total (es decir, la SNR que se obtiene al conectar en cascada los dos sistemas) es [29]:

$$SNR_{A-R} = SNR_1 SNR_2 / (1 + SNR_1 + SNR_2) \quad (3.1)$$

El análisis de la expresión anterior revela dos aspectos interesantes: (a) la SNR del enlace en cascada es siempre peor que la SNR de los enlaces individuales y (b) si las SNR individuales alcanzan un nivel medio alto y toman un valor semejante, la SNR del sistema con repetición A-R es aproximadamente  $SNR_{A-R} \approx SNR_1/2 = SNR_2/2$ . Para el caso de la Figura 3.1(b), el valor de la SNR en cascada sería, por tanto, 8 veces mayor, mientras que para el caso de la Figura 3.1(c) sería 3,01 veces mayor.

La expresión de la SNR puede utilizarse para obtener la BER del sistema completo como  $BER_{A-R} = Pe(SNR_{A-R})$

<sup>1</sup>El impacto de los repetidores, así como de las distintas estrategias de repetición, en el nivel de diversidad del sistema se discutirá con más detenimiento en la sección 3.5.

- Por el contrario cuando, se utiliza un esquema de decodificación y reenvío, la BER puede analizarse sin necesidad de acudir a la SNR, puesto que si se asume que los errores introducidos por el canal son independientes en ambos enlaces se tiene que:

$$BER_{D-R} = Pe(SNR_1) + Pe(SNR_2) - Pe(SNR_1)Pe(SNR_2) \quad (3.2)$$

En sistemas prácticos la BER es menor que el 1 %, por lo que la expresión anterior puede aproximarse por  $BER_{D-R} = Pe(SNR_1) + Pe(SNR_2)$ .

Al igual que lo que ocurría en el caso de A-R, esta expresión pone de manifiesto que el rendimiento del sistema conjunto es peor que el rendimiento de cada uno de los enlaces por separado.

Puesto que en la sección anterior se comprobó cómo la inserción de un elemento repetidor mejora la SNR de forma considerablemente, las expresiones anteriores ponen de manifiesto que la mejora de la SNR se traduce también en una mejora de la BER. Si se compara la ganancia en términos de BER que cada uno de los esquemas introduce, es fácil comprobar que para canales fijos la estrategia de decodificación y reenvío suele superar a la de amplificación y reenvío:

- Para el caso simétrico (SNRs con valores semejantes) se tiene que  $BER_{A-R} \approx Pe(SNR_1/2)$ , mientras que  $BER_{D-R} \approx 2Pe(SNR_1)$ . Puesto que las funciones de probabilidad de error son típicamente convexas [28], se tiene que  $Pe(SNR_1/2) > 2Pe(SNR_1)$ , por lo que  $BER_{A-R} > BER_{D-R}$ .

Además mejora crece a medida que se introducen más repetidores [30]. No obstante, la estrategia de amplificación y reenvío se comporta mejor en entornos para canales con desvanecimientos, dado que recolecta toda la información del primer enlace, en los que se emplean estrategias cooperativas, tal y como se describirá en el apartado 3.5. En cualquier caso, debe señalarse que desde un punto de vista práctico la elección entre una estrategia y otra se debe más a cuestiones de arquitectura del sistema y no tanto a la superioridad en términos de BER de una estrategia frente a otra.

### 3.4. Configuraciones del repetidor para la multiplexación de la señal retransmitida

Otro aspecto fundamental en los sistemas de repetición es la forma en la que el que el repetidor multiplexa la señal retransmitida. Si por simplicidad consideramos que el sistema no utiliza distintos códigos CDMA y que únicamente separa los distintos flujos de transmisión en el dominio del tiempo y de la frecuencia, el repetidor puede tomar una de las siguientes decisiones:

- A. Retransmisión instantánea en la misma frecuencia.
- B. Retransmisión instantánea en distinta frecuencia.
- C. Retransmisión diferida en la misma frecuencia.
- D. Retransmisión diferida en distinta frecuencia.

La configuración “clásica” de reenvío es la A y no supone un coste de recursos, aunque las limitaciones en términos de hardware hacen que sea complicado implementarla en la práctica. Por el contrario, las configuraciones B, C y D sí acarrearán un coste, puesto que la señal se retransmite en un canal distinto

Coeficiente de pérdidas: $\eta$	SNR sin repetición	$SNR_1 = SNR_2$	Capacidad sistema sin repetición	Capacidad sistema con repetición	Capacidad sistema Two-way Relaying
2	0.1	0.4	0.14	0.24	0.48
2	1	4	1.0	1.16	2.33
2	10	40	3.46	2.68	5.36
4	0.1	1.6	0.14	0.69	1.38
4	1	16	1.0	2.04	4.08
4	10	160	3.46	3.66	7.32

Cuadro 3.1: Comparación de la capacidad obtenida para sistemas con y sin repetición.

del de llegada (y, por lo tanto, ninguno de ellos puede ser utilizado por otros usuarios<sup>2</sup>). En principio, todas las configuraciones son compatibles con cualquiera de las estrategias de retransmisión a nivel físico presentadas en el punto anterior. No obstante, debido a limitaciones en el hardware, en la práctica las configuraciones A y B suelen utilizarse cuando el repetidor utiliza una estrategia de amplificación y reenvío, mientras que las configuraciones C y D suelen utilizarse cuando el repetidor utiliza una estrategia de decodificación y reenvío.

Así pues, queda claro ahora que la utilización de repetidores no supone únicamente un coste a nivel económico o de complejidad del sistema, sino también a nivel físico. De esta manera puede afirmarse que desde el punto de vista físico, la inserción de un repetidor supone: (a) un coste en términos de uso del canal y (b) un beneficio en términos de SNR. Para analizar el compromiso (“trade-off”) entre ambos efectos puede utilizarse la fórmula de la capacidad de canal desarrollada por Shannon. Dicha fórmula establece que la tasa de información máxima (capacidad) que puede enviarse por un canal con un ancho de banda  $W$  y una relación señal a ruido en el receptor SNR es:

$$C = W \log_2(1 + SNR) \text{ bits por segundo} \quad (3.3)$$

Considérese ahora la inserción de un repetidor<sup>3</sup> con retransmisión diferida y operando en una única frecuencia. Como se ha indicado antes, en esto supone que el ancho de banda debe repartirse entre el enlace transmisor-repetidor y el enlace repetidor-receptor, lo que supone una pérdida de eficiencia del 50%. Por otro lado, cada uno de los enlaces tendrá una mejor SNR que la del enlace inicial entre transmisor y receptor. La siguiente tabla analiza la tasa global para distintas configuraciones. Por sencillez se supone que  $W = 1$  y que el elemento repetidor se coloca en el punto medio entre transmisor y receptor.

En primer lugar, debe señalarse que para que los resultados anteriores sean válidos, debe tenerse en cuenta que tanto el transmisor como el repetidor deben ser capaces de transmitir con distintas modulaciones. Para ilustrar este comentario tómesese el ejemplo mostrado en la segunda fila de la Tabla 1, donde  $\eta = 2$  y la SNR del sistema sin repetición es 1. En este caso la capacidad del sistema sin repetición es  $C = \log_2(1 + 1) = 1$ , mientras que la capacidad del canal entre transmisor y el receptor es  $C = \log_2(1 + 4) = 2,33$ . Puesto que este enlace sólo está activo durante el 50%, la tasa media transmitida es de 1.16, que corresponde al valor mostrado en la última columna de la tabla. Esto implica que cuando no existe repetidor, el transmisor debe transmitir con unos esquemas de modulación y codifica-

<sup>2</sup>Si existe más de un repetidor entre el transmisor y el receptor, se pueden utilizar estrategias que permitan transmisiones concurrentes y reutilización de frecuencias

<sup>3</sup>Para este caso se puede considerar que se ha utilizado una estrategia de Decodificación y Reenvío donde la BER es cercana a 0.

ción que den lugar a una tasa combinada de 1 (por ejemplo, una modulación QPSK con un codificador de tasa 1/2). Por otro lado, cuando el repetidor está presente, el transmisor debe utilizar unos esquemas de modulación y codificación que den una tasa combinada de 2.33 (por ejemplo, una modulación 128-QAM con un codificador de tasa 1/3).

Una vez aclarado el proceso de cálculo de los valores mostrados en la Tabla 3.1, pasamos a comparar los resultados obtenidos para distintas configuraciones. Las dos observaciones principales son:

- Las diferencias entre la capacidad alcanzada por el sistema con y sin repetición dependen fuertemente de las condiciones iniciales.
- Cuanto menor sea el coeficiente de pérdidas y mayor sea la SNR del enlace inicial entre transmisor y receptor, menor es la ganancia debida a la inserción del repetidor, pudiendo incluso llegar a ser negativa (véase la tercera fila de la Tabla 3.1).

En general, puede afirmarse que, desde un punto de vista físico, la inserción de un repetidor resulta beneficiosa en lo mayoría de escenarios prácticos (recuérdese que la motivación principal de los elementos de repetición era mejorar la cobertura, por lo que es poco razonable suponer que la SNR del enlace principal sea muy alta). No obstante, la existencia del “trade-off” entre pérdida de ancho de banda y ganancia de SNR es más relevante cuando se considera la inserción de varios repetidores. Esto sucede porque si cada repetidor utiliza una frecuencia (“spot” de tiempo), la pérdida de ancho de banda se hace cada vez mayor (por ejemplo, se alcanza una eficiencia de tan sólo el 25 % para sistemas con tres repetidores). Una posible alternativa para los sistemas con múltiples repetidores consiste en la reutilización de frecuencias (“slots” de tiempo), para saltos no consecutivos. Esta alternativa se ilustra en la Figura 3.2, donde  $t$  denota los instantes en los que el enlace está activo dentro del intervalo  $\{0, 1, 2, 3\}$ .

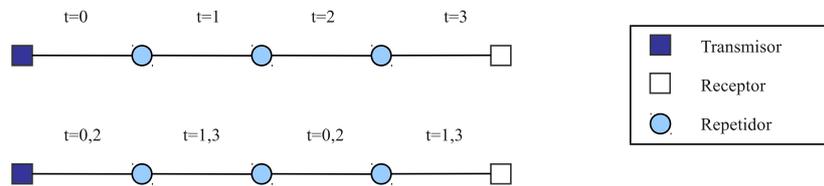


Figura 3.2: Dos alternativas para la transmisión en un enlace con cuatro saltos.

Otra segunda alternativa, que requiere mayor complejidad, pero que obtiene una mayor eficiencia de transmisión consiste en el uso de un esquema de “two-way-relaying”. Este esquema aprovecha el hecho de que la mayoría de sistemas de comunicaciones son bidireccionales. Para un sistema con un repetidor y dos terminales (estación base y usuario), se consideran dos “slots” de transmisión con el esquema de funcionamiento que se describe a continuación. Durante el primer “slot” transmite tanto la estación base (enlace descendente) como la estación usuario (enlace ascendente). Puesto que la transmisión es simultánea, el repetidor recibe la suma de las dos señales. Durante el segundo slot el repetidor amplifica y retransmite la señal recibida en el slot anterior. Tanto la estación base como el usuario reciben una señal que consiste en la suma de la señal del canal ascendente y la del canal descendente. No obstante, como cada uno de ellos conoce la señal que transmitió durante la primera fase, puede sustraerla a la recibida durante la segunda fase y obtener así la señal de la que es destinatario. Una descripción más detallada sobre este método, así como sus repercusiones en tareas como la estimación de canal y la transmisión en sistemas de múltiples antenas puede encontrarse en [31].

### 3.5. Repetición cooperativa

Hasta ahora se han analizado sistemas con repetidores en los que el enlace principal es reemplazado por la concatenación de dos enlaces: el enlace entre transmisor y repetidor y el enlace entre el repetidor y el receptor. No obstante, nada impide que el enlace inicial entre transmisor y receptor siga estando activo y que los enlaces establecidos con el repetidor se vean como enlaces adicionales que añaden robustez y fiabilidad al sistema. Así pues, si consideramos el esquema que se muestra en la Figura 3.2, puede concluirse que en realidad existen tres enlaces: entre transmisor y receptor, entre transmisor y repetidor y entre repetidor y receptor. De esta manera, cuando el transmisor (fuente) transmite su mensaje, ese mensaje es en principio recibido tanto por el repetidor como por el receptor. En este caso, si el receptor es capaz de demodular el mensaje, el repetidor no tiene porqué hacer nada. No obstante, si el receptor no es capaz de obtener correctamente el mensaje, puede pedir ayuda al repetidor que retransmitirá el mensaje recibido. Esta repetición puede hacerse de forma automática, a petición del receptor, o en función de ciertos parámetros medidos por el repetidor.

El escenario donde el repetidor se considera como un elemento redundante que sirve de apoyo al enlace principal se conoce como *repetición cooperativa*. La repetición cooperativa resulta provechosa tanto en canales inalámbricos fijos como en móviles. No obstante, es especialmente atractiva en este último caso. Esto se debe a que, independientemente de cual sea la potencia transmitida, los canales móviles sufren desvanecimientos que degradan severamente la SNR en el receptor. Esto supone que aunque la calidad del enlace entre el repetidor y el receptor sea muy alta, para un instante determinado la SNR instantánea puede ser próxima a cero. Sin embargo, si el receptor considera también el enlace inicial con el transmisor, es improbable que ambos enlaces sufran simultáneamente un desvanecimiento. Esta propiedad se conoce como diversidad espacial (llamada por algunos autores diversidad cooperativa para el caso de los repetidores), es similar a la obtenida por terminales móviles con dos antenas y supone una mejora considerable en la BER en sistemas móviles.

El mayor problema de la repetición cooperativa consiste en la combinación de las señales recibidas por ambos caminos en el receptor. Existen dos mecanismos fundamentales:

- *Maximum ratio combining* (MRC). Desde un punto de vista de SNR, éste es el esquema óptimo de combinación [28]. Para implementar el método MRC se necesita conocer con exactitud el valor de la SNR y el desfase de cada uno de los caminos. Una vez que se conocen estos valores, los desfases se corrigen y a cada rama se le da un peso proporcional a la raíz cuadrada de su SNR (de forma que la rama con mejor SNR tiene un mayor peso). De forma intuitiva, la recepción mejora porque las señales se combinan de forma coherente (y por lo tanto se suman en amplitud), mientras que los ruidos se combinan de forma incoherente (y por lo tanto se suman en potencia). De forma cuantitativa, puede demostrarse que para este esquema, la SNR total es la suma de las SNR de cada uno de los caminos. Asimismo, para el caso de canales con desvanecimientos, puede demostrarse que este esquema es capaz de recolectar toda la diversidad ofrecida por el canal.
- *Selection combining* (SC). El esquema SC es más simple que el anterior [28]. Simplemente necesita saber cuál de los caminos tiene una mejor SNR y utiliza ese camino para demodular la señal. Aunque la SNR total en este caso es peor que en el caso del esquema MRC, este esquema también es capaz de recolectar toda la diversidad del sistema. Por otro lado, el esquema SC es mucho más sencillo de implementar que el esquema MRC (el procesamiento puede ser digital y el esquema puede implementarse de forma asíncrona), por lo que resulta adecuado para su implementación en sistemas reales.

Finalmente, en lo que a diversidad de sistemas con repetición cooperativa se refiere, es importante señalar que, como ya se había indicado, las estrategias de amplificación y reenvío y de decodificación y

reenvío adaptativo permiten recolectar el nivel máximo de diversidad (ya sea utilizando el sistema MRC o el SC). Sin embargo, cuando el repetidor utiliza una estrategia de decodificación y reenvío, no puede garantizarse que se recolecte el nivel máximo de diversidad (independientemente de que se utilice el sistema MRC o el SC).

### 3.6. El papel de los repetidores en niveles superiores

Además de las ventajas a nivel físico, la presencia de repetidores puede aportar ventajas en niveles superiores, sobre todo cuando los repetidores son flexibles e inteligentes.

Así pues, a nivel de enlace la presencia de repetidores puede resultar provechosa para realizar las tareas de asignación recursos de acceso al medio (“scheduling”) y calidad de servicio. En principio, se distinguen dos estrategias principales en función de la autonomía (inteligencia) del repetidor:

- La estación base asigna al repetidor una serie de recursos (frecuencias, códigos o “slots”de tiempo) para que el repetidor los asigne como estime oportuno a los usuarios que sirve. Las ventajas son que el sistema es más fácil de operar, puesto que la estación base (y el repetidor) tiene que ocuparse de menos usuarios, las desventajas son que el sistema es más ineficiente (se dispone de menos grados de libertad).
- El repetidor actúa como mero intermediario y es la estación base quien gestiona todos los recursos. En este caso el sistema puede optimizar los recursos de forma más eficiente que en el caso anterior, pero la estación base tiene que ser más compleja y la señalización es más pesada.

En lo que al nivel de red se refiere, la presencia de repetidores puede verse como un primer paso para la implementación de redes ad-hoc inalámbricas. En estas redes (auto-configurables y plenamente distribuidas), cualquier terminal puede ejercer funciones de encaminamiento (es decir, cualquier nodo puede actuar como un “router”). En el caso de redes con repetidores, los nodos genéricos no podrían realizar tareas de encaminamiento, pero sí los repetidores. Para poder aprovechar al máximo las ventajas que los repetidores pueden aportar para realizar tareas de encaminamiento, la arquitectura de la red debiera ser tal que permitiera las dos condiciones siguientes: (a) un repetidor es capaz de servir a varios usuarios y (b) un mismo usuario es capaz de estar conectado a varios repetidores.

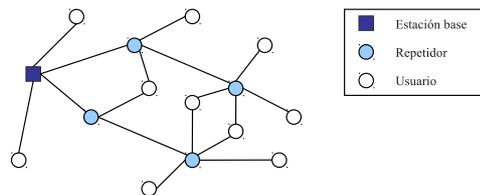


Figura 3.3: Ejemplo de topología para una red con varios saltos de repetición.

## 4 Introducción al estándar 802.16j

La tecnología WiMAX, tal y como la define el estándar 802.16-2009, tiene una limitación inherente al funcionamiento punto a multipunto: la única solución para aumentar la cobertura y la capacidad de las redes WiMAX se basa en el utilizar un número mayor de BS. Dados los altos costes que esto supone, los miembros del grupo 802.16 del IEEE comenzaron a buscar soluciones y optaron por proponer el uso de estaciones repetidoras y retransmisoras. Esta opción ha tomado forma en la enmienda 802.16j [23], que establece el uso de este tipo de estaciones de forma compatible con el estándar 802.16-2009 [22].

En el siguiente apartado se muestra un resumen de las principales características de esta enmienda, diferenciando entre las novedades que propone en la capa PHY, y las que propone en la capa MAC. Para una información más detallada sobre su descripción interna, se recomienda leer el capítulo 7.

### 4.1. Características físicas - Capa PHY

La enmienda se propone para la ampliación de la cobertura y el aumento de la capacidad de redes que ofrecen movilidad utilizando una capa PHY WirelessMAN-OFDMA (bandas licenciadas), a través de la definición de una nueva estación: la estación retransmisora (RS). Es decir, las redes que se basen en esta enmienda, a las que denominaremos a partir de ahora redes 16j, estarán conformadas por tres tipos de estaciones: la Multihop Relay Base Station (MR-BS), la Relay Station (RS) y la Mobile Station (MS). Ésta última, podrá conectarse o bien a una MR-BS, o a través de una RS, aunque en todos los casos considerará que está conectándose a una BS. La RS puede, a su vez, estar conectada a una MR-BS o a otra RS, permitiendo de esta forma redes multisalto<sup>1</sup>.

En este contexto, el estándar define dos tipos de RS: aquellas que sirven para aumentar la capacidad de la red, y aquellas que sirven para ampliar la cobertura. En el primer caso, las MS están en el rango de la MR-BS por lo que obtienen toda la información de control necesaria de la MR-BS y sólo utilizarán la RS para aumentar la capacidad del enlace<sup>2</sup>. Este concepto da lugar a las RS transparentes. Por contra, en el segundo caso, las MS no se encuentran en el rango de cobertura de la MR-BS y por tanto, las RS tienen que transmitir información de control a las MS para que éstas permanezcan sincronizadas y conozcan su planificación. Estas RS se denominan no transparentes.

Por tanto, se pasa de una arquitectura donde la BS transmitía en el DL y la SS en el UL, a una donde éstas siguen realizando las mismas tareas, pero ahora existe un elemento intermedio, la RS, que tiene que transmitir y recibir en ambos. Para ello, a ojos de la RS, cada una de las subtramas pasará a dividirse en relay zone (en la que el tráfico va hacia la MR-BS) y access zone (donde el tráfico va hacia la MS). Por lo que la percepción de la trama que tienen la MR-BS y la RS es distinta. A modo de ejemplo, en la Figura 4.1 se muestran las tramas del modo no transparente según la perspectiva de la MR-BS y de la RS.

Como se puede apreciar, ambas transmiten información de control al principio de la trama a aquellas MS que se conectan directamente a ellas. También se puede apreciar como en el downlink hay un tramo en el que la RS transmite (DL Access Zone) y otro en el que recibe información de la MR-BS (DL Relay Zone), al igual que ocurre en el UL.

<sup>1</sup>El número de saltos máximos no ha sido definido.

<sup>2</sup>Bajo la asunción de que dos enlaces cortos pueden tener más capacidad que uno largo.

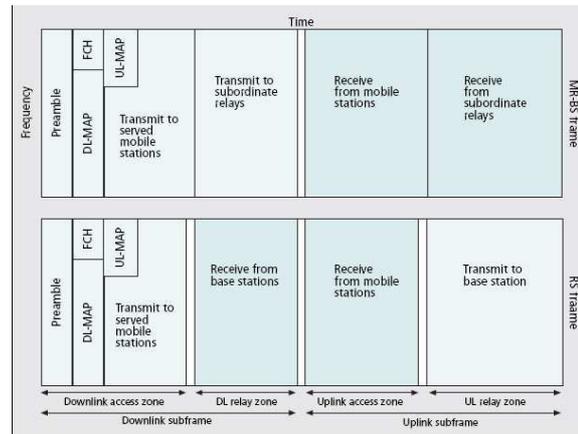


Figura 4.1: Formato de trama del modo no transparente (Dos saltos).

A nivel físico, el estándar define, a su vez, dos tipos de estaciones no transparentes: aquellas que pueden transmitir y recibir a la vez, denominadas STR, y aquellas que no pueden hacerlo, denominadas TTR. En el primer caso se pueden realizar múltiples saltos ya que las estaciones contarían con dos radios y utilizarían una de las radios en modo de transmisión y la otra en recepción. Sin embargo, la operación en más de dos saltos utilizando estaciones TTR es más complicada, ya que las RS intermedias reciben los datos de sus RS “superiores” en la zona relay del DL, por lo que no pueden transmitir a la vez a su subordinada los datos que ésta espera en esta zona. Para ello el estándar propone dos soluciones: dividir la DL Relay Zone en tantas zonas como saltos existan. La trama resultante se muestra en la Figura 4.2, o crear multitramas en las que cada zona se utilizaría en un salto distinto [32].

El uso de estaciones TTR también plantea la necesidad de un nuevo mecanismo para que éstas se sincronicen con la MR-BS, dado que no podrán hacerlo al comienzo de la trama, puesto que estarán transmitiendo información de control a sus subordinadas. Para solucionarlo, el estándar define que estas estaciones reciban la estructura de la trama al inicializarse y la información de sincronización (preámbulo) al comienzo de la zona de relay del DL.

Las RS STR y las RS transparentes reciben la estructura de la trama y la sincronización al comienzo de la trama tal y como ocurría en el modo punto a multipunto.

Otras de las novedades que ofrece esta enmienda a nivel físico es la cooperación entre MR-BS y RS para aumentar la capacidad. En concreto, se propone diversidad de fuente cooperativa, diversidad en transmisión cooperativa y diversidad híbrida cooperativa.

La enmienda también define que en el modo transparente se puede utilizar una parte de la trama, denominada Direct Zone, donde la RS demodula y desentrelaza los datos que recibe y los vuelve a modular y entrelazar para transmitirlos en la misma trama.

## 4.2. Características lógicas - Capa MAC

La enmienda 802.16j define que la operación de las estaciones no transparentes en una red multisalto se puede dar en modo centralizado o distribuido. En el modo centralizado la MR-BS genera mapas (DL-MAP y UL-MAP para la zona de acceso y R-MAP para la de relay) e información de control (UCD y DCD que definen la operación en los canales de subida y bajada, respectivamente) que serán utilizados por las RS para planificar sus transmisiones desde y hacia sus estaciones subordinadas. En concreto, la MR-BS le envía un mensaje denominado RS\_Access-MAP a la RS que contiene los mapas que la

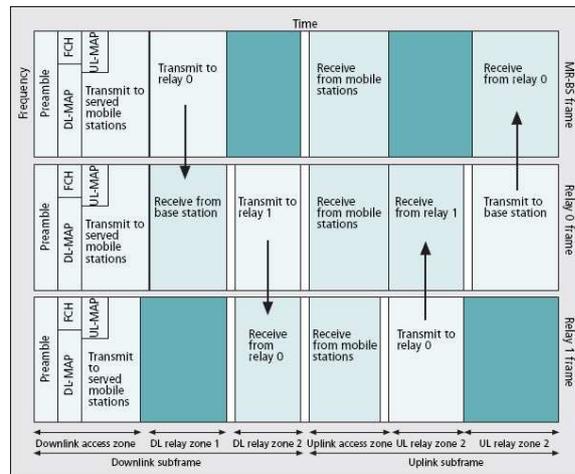


Figura 4.2: Formato de trama del modo no transparente (Múltiples saltos).

RS ha de transmitir en la DL access zone de la siguiente trama. Si la red tiene más de dos saltos, se puede utilizar el RS\_Relay-MAP, mensaje enviado por la MR-BS a sus RS subordinadas que contiene los mapas transmitir a sus RS subordinadas en la zona de relay. En el modo distribuido cada RS decide la planificación de sus estaciones subordinadas, sean SS o RS, y genera y envía sus propios mapas.

A parte de las tareas de planificación, otra de las principales novedades de este estándar es la definición de un nuevo tipo de paquete de datos denominado Relay MAC PDU para que en cada salto las RS se comporten como relays y no como una mezcla de MS y BS [32]. La Relay MAC PDU es utilizada conjuntamente con el tunelado de conexiones, en el que éstas pueden ser transportadas en el contexto de un túnel que puede transportar datos de varias conexiones de las MS a las que da acceso. Cada CID de túnel transporta en su cabecera sus requisitos de QoS, que, como mínimo, han de ser iguales a las suma de aquellos CID que transporta. Esto simplifica las tareas a realizar por los relays intermedios, requiriendo, en concreto, llevar a cabo menos tareas de planificación. Este concepto se representa en la Figura 4.3.

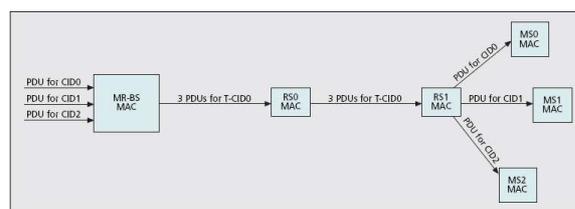


Figura 4.3: Ejemplo de tunelado de identificadores de conexión (T-CID).

También se establece un túnel para las conexiones de gestión. Sin embargo, la capacidad de tunelar las conexiones es opcional, y siempre se podrá hacer uso del método tradicional de CID.

El estándar también define mecanismos para el establecimiento, mantenimiento y liberación de caminos entre la MS y la MR-BS. Las decisiones a este respecto las toma la MR-BS basándose en la información sobre disponibilidad de recursos radio, calidad del enlace o la carga de tráfico que le envía cada RS. Para el mantenimiento de los caminos establecidos, el estándar define dos mecanismos: embebido y explícito. En el primero, los CID se asignan de forma jerárquica para que no sea necesaria más señalización para conocer un camino; mientras que en el segundo la MR-BS asigna un path ID a cada

CID.

También existe preocupación por la validez de la información sobre la calidad del canal, ya que, como 802.16j está pensado para usuarios móviles, una red donde los usuarios tengan mucha movilidad, puede implicar un estado del canal que varíe muy rápido [33]. Es estándar plantea varios mecanismos para el reporte del estado del canal para mantener una información actualizada del mismo y así solucionar este problema. Por último, la capa MAC de 16j también actualiza mecanismos como el ARQ híbrido (HARQ), la seguridad e incluye otros como el agrupamiento de RS. Sin embargo, la aplicación de todas ellas se ve limitada por el contexto de comunicaciones fijas en el que se enmarca este proyecto.

### 4.3. Estado del arte en investigación

Desde hace varios años se vienen presentando trabajos que describen las características de sistemas de repetición bajo el estándar WiMAX. Sin embargo, es en 2008 cuando la extensión IEEE 802.16j se desarrolla con más detalle y cuando, en consecuencia, comienzan a aparecer artículos que describen de forma más minuciosa el estándar. Estos trabajos han sido desarrollados tanto por miembros del WiMAX Forum [34], como por investigadores externos al mismo. Los diferentes enfoques de cada trabajo permiten clasificarlos en tres tipos de artículos diferentes: artículos que describen el estándar y las funcionalidades del mismo en distintos escenarios; artículos que evalúan las características de los distintos modos de funcionamiento del 802.16j, y artículos que analizan la mejor forma de diseñar una red 802.16 con repetidores.

Entre los artículos pertenecientes al primer grupo destacan [35] y [36], que describen de forma precisa los diferentes modos de funcionamiento de un repetidor: transparente, no transparente distribuido y no transparente centralizado. En concreto [35] evalúa las mejoras en términos de capacidad y cobertura proporcionadas por cada modo, considerando el exceso de tráfico producido por la señalización y la eficiencia espectral ofrecida. Peters y Heath [36] analizan de igual forma los modos de funcionamiento de 16j, describiendo los posibles escenarios de uso. Asimismo, analiza las distintas alternativas de técnicas de comunicación cooperativa que podría soportar el estándar. Yang et al. [37] realizan un interesante análisis sobre las mejoras que un sistema de repetición puede aportar tanto a las redes WiMAX como a las redes LTE-Advanced. Según este artículo, para cubrir los requisitos de capacidad de las nuevas redes de datos inalámbricas será necesario hacer uso de repetidores, independientemente de la tecnología utilizada.

Respecto a los artículos cuyo fin es evaluar las prestaciones de los sistemas 16j, destacan, a parte de [35], los trabajos de Wei [38], Bian [39] y Schoenen [40]. En [38] se propone un análisis de la capacidad en el enlace de acceso WiMAX cuando existen varios niveles de repetición. El trabajo asegura que a medida que aumenta el número de saltos la capacidad del enlace de acceso disminuye, ya que en cada salto es necesario agregar los tráficos provenientes de distintos usuarios. Esta situación se puede paliar ajustando convenientemente tanto la modulación como la tasa de codificación en cada uno de los saltos. Bian et al. [39] analizan la capacidad y cobertura de un sistema WiMAX con varios saltos, particularizando los resultados a un sistema celular con macro y micro celdas y utilizando un único relay, observándose una clara mejora de ambos parámetros. Finalmente, en [40] se realiza un análisis de la mejora en términos de capacidad y cobertura que puede proporcionar un sistema WiMAX con repetidores en un escenario real (en concreto, en Jersey, EE.UU.). El resultado también confirma las posibilidades de aumento de prestaciones que proporciona la modificación 16j sobre el estándar 802.16. En esta categoría también se incluye un interesante trabajo realizado por Davido et al. [41], en el que se comparan las prestaciones de un repetidor WiMAX y de un repetidor de radiofrecuencia (RF) mucho más sencillo que el primero, asegurando que los sistemas de repetición WiMAX mejoran las prestaciones de los repetidores RF convencionales tanto en velocidad de bit como en cobertura.

Finalmente, existen multitud de artículos que analizan diferentes parámetros del diseño de una red 802.16j con el fin de maximizar las prestaciones de la misma. Específicamente, para un buen diseño de la red es necesario posicionar convenientemente los repetidores. Además, cuando entre el terminal móvil y la estación base existen diferentes rutas, es conveniente seleccionar la más adecuada para la transmisión eficiente de la información, lo cual es objeto de estudio en [42]. Por otro lado, el estándar 802.16 deja una alta flexibilidad a la hora de gestionar los recursos radio de los que dispone la red, es por ello que el diseño de algoritmos óptimos de planificación de estos recursos ha sido ampliamente tratado. En [43] y [44] se aborda este tema cuando se añaden repetidores a la red, lo cual modifica notoriamente el tipo de planificación que es posible realizar.

En el siguiente punto desarrollaremos este breve resumen del estado del arte con el fin de describir de forma más detallada los parámetros más destacados que es necesario optimizar durante el diseño de las redes WiMAX con repetidores, basándonos principalmente en el contenido de los artículos descritos aquí.

### **4.3.1. Aspectos clave del diseño de redes 802.16j**

A continuación se enumeran y describen los aspectos más importantes del diseño de redes 802.16j. Estos elementos del diseño deben ajustarse de forma adecuada para que el uso de repetidores implique realmente una mejora de prestaciones. En concreto, analizamos la elección de la posición de los repetidores y la selección del repetidor adecuado cuando existe más de una ruta utilizable, la selección de frecuencias adecuada, los algoritmos de planificación de recursos existentes y las distintas técnicas de diversidad utilizables al añadir repetidores a la red.

#### **4.3.1.1. Posicionamiento y uso óptimo de los repetidores**

El posicionamiento de los repetidores es uno de los aspectos más importantes que determinan la capacidad de una red 802.16j. Dada una estación base, varias estaciones repetidoras y una zona que debe estar cubierta por el conjunto de los repetidores, es necesario calcular el posicionamiento óptimo de los repetidores para satisfacer la capacidad de red requerida. Este problema se puede resolver mediante un mecanismo de cálculo de las posiciones óptimas basado en cuatro fases [45]. En la primera se divide la zona total de cobertura en tantas partes iguales como repetidores haya. En la segunda y tercera fases, se identifican en cada parte las áreas situadas a una distancia intermedia de la estación base, de forma que ésta no quede ni demasiado cerca ni demasiado lejos. Estas regiones son candidatas a albergar un repetidor. En la última fase se ajusta la posición de cada repetidor dentro de una región candidata dividiendo ésta en una serie de puntos y calculando la capacidad de red obtenida en cada caso, seleccionando aquella que maximice este parámetro. Si se asume además que el terminal está en movimiento, el escenario cambia de forma constante y es necesario tener en cuenta la variación estadística de la posición del usuario y los recursos que va a necesitar [46, 47].

En los casos en los que existen varios repetidores que cubren la misma zona, existen consecuentemente múltiples caminos que puede seguir la información que viaja del terminal móvil a la estación base, por lo que es necesario seleccionar la ruta que mejores prestaciones pueda proporcionar. Una técnica habitual para solventar este problema es la selección oportunista del repetidor, que consiste en utilizar en cada momento el repetidor para el cual la relación señal a ruido del camino completo es la más alta [48]. En este caso, es necesario que el transmisor tenga conocimiento del canal, lo cual requiere de complejos mecanismos de realimentación, haciendo que estas estrategias tengan que estar bien diseñadas [42].

En general, todas estas consideraciones son válidas para redes WiMAX utilizadas en entornos urbanos y con arquitecturas celulares. El problema de selección de la posición de un repetidor es también muy

importante en las redes de áreas rurales, donde el objetivo de diseño será minimizar el coste y el consumo y proporcionar cobertura en zonas dispersas alejadas de los núcleos urbanos.

#### 4.3.1.2. Planificación de frecuencias

La planificación de red tiene como objetivo maximizar el número de usuarios que pueden acceder a la red simultáneamente y la capacidad que dicha red puede ofrecer. Para conseguirlo, WiMAX soporta un mecanismo de reconfiguración del uso de frecuencias. Al incorporar la posibilidad de incluir repetidores, es necesario revisar este mecanismo para ver si es el más adecuado [49].

El problema de selección de frecuencias cuando la red es celular y se dispone de varias portadoras es complejo. Además, debido a la adaptatividad de los enlaces WiMAX, el procedimiento debe ser iterativo y dinámico. En cada iteración, se seleccionan para cada repetidor y cada BS las frecuencias que minimizan el conjunto de interferencias [50], evaluándose finalmente las interferencias producidas con el plan seleccionado. En [49], la optimización de frecuencias en cada iteración se realiza mediante algoritmos heurísticos, y se observan tanto las relaciones señal a interferencia producidas en cada paso, como la capacidad total de la red.

#### 4.3.1.3. Planificación de recursos

WiMAX proporciona una gran flexibilidad a la hora de asignar recursos a los distintos usuarios. Por este motivo, existen multitud de trabajos que proponen algoritmos de planificación que tratan de optimizar algunos parámetros del servicio, como la tasa de transmisión, el número de usuarios o disminuir las interferencias. Para ello es preciso conocer, en general, los requisitos de calidad de servicio de cada conexión de cada usuario y el estado del canal inalámbrico. Este escenario cambia considerablemente cuando en la red se disponen los repetidores definidos en el estándar 802.16j, ya que al aumentar el número de saltos entre la estación base y el usuario final, la complejidad de los algoritmos de planificación también se incrementa.

El problema de planificación de recursos en redes 802.16j puede, a su vez, dividirse en tres tareas fundamentales [51]. En primer lugar, es necesario seleccionar la ruta entre el terminal móvil y la estación base que minimice los errores y el tiempo de transmisión, de forma que se reduce el uso de recursos para una determinada conexión. En segundo lugar, una vez seleccionada la ruta es necesario asignar un mayor o menor tiempo de transmisión y un mayor o menor ancho de banda a cada una de las conexiones, teniendo en cuenta los requisitos del servicio soportado. Por último, también es preciso definir qué recursos puede utilizar cada repetidor, de forma que se decida qué repetidores pueden transmitir de forma concurrente en la misma frecuencia, aprovechando así las posibilidades de reutilización de frecuencias que una red celular proporciona.

Existen diferentes métodos de realizar la planificación de frecuencias y la de recursos de forma simultánea, con el fin de maximizar la capacidad de la red y garantizar calidad de servicio a todos los usuarios de la misma [52][53][50]. En el caso de que el sistema permita acceso por multiplexación en subportadora (OFDMA) además es posible la selección de un subrango de frecuencias diferente para cada usuario, siendo habitual en este caso que cada portadora sea utilizada por el usuario para el cual el canal es mejor en dicha frecuencia, técnica denominada acceso oportunista [44].

#### 4.3.1.4. Estrategias de cooperación

Desde los comienzos de las comunicaciones inalámbricas el uso de repetidores es un hecho habitual, ya que permite aumentar la cobertura de un sistema y alcanzar largas distancias sin un aumento excesivo de la potencia consumida. Sin embargo, desde hace una década, aproximadamente, estos elementos han

recibido especial atención en tanto en cuanto permiten mejorar las prestaciones de un sistema de comunicaciones mucho más allá del hecho de aumentar su cobertura. En concreto, la existencia de un repetidor permite duplicar la información que le llega al receptor de forma que éste tenga más información sobre la misma señal y pueda decodificarla con mayores garantías de éxito. El objetivo es, por tanto, disminuir la probabilidad de error haciendo uso de la diversidad espacial inherente a los distintos caminos que aparecen entre el transmisor y el receptor cuando se interponen uno o más repetidores entre ellos.

El uso de repetidores en WiMAX proporciona la posibilidad de utilizar este tipo de técnicas, denominadas comunicaciones cooperativas. De entre las estrategias de cooperación posibles, WiMAX permite, como mejoras opcionales, utilizar tres [36]. La primera se denomina diversidad cooperativa de fuente, y consiste en que tanto los repetidores como la estación base transmitan de forma simultánea la misma información de forma que el terminal móvil obtenga diferentes copias de la misma información, de las cuales es capaz de extraer la diversidad espacial. La segunda estrategia se denomina diversidad cooperativa en transmisión, que implica el uso de códigos espacio temporales distribuidos para obtener un sistema de múltiples antenas virtual haciendo uso de los repetidores. Finalmente, la tercera técnica se denomina diversidad cooperativa híbrida, y consiste en una combinación de los modos anteriores.

A la hora de retransmitir la señal según una estrategia de cooperación de fuente, es posible utilizar las técnicas ya descritas anteriormente, es decir, técnicas no regenerativas y técnicas regenerativas, tal y como se describe en [37], donde se detallan los métodos de amplificación y reenvío, decodificación y reenvío selectivo, y decodificación y reenvío. También es posible retransmitir la misma información varias veces con cierto retardo con el fin de aumentar la selectividad en frecuencia y así obtener diversidad. Estas técnicas están descritas en [54], donde se describe su aplicabilidad al estándar WiMAX. Además, cuando es posible utilizar OFDMA, una adecuada planificación de recursos permite obtener la diversidad tanto frecuencial como especial del canal, tal y como se explica en [43]. Finalmente, cuando existen varios repetidores con los que el terminal del usuario puede cooperar, es necesario seleccionar aquel que proporcione mejores prestaciones. Por tanto, será necesario utilizar estrategias de selección de repetidores análogas a las vistas anteriormente ahora con el fin de obtener la máxima diversidad posible [37].

#### 4.3.2. Escenarios posibles para las redes 802.16j

La variedad de modos de funcionamiento de los repetidores 802.16j permite su utilización en escenarios diversos [36]. Los casos en los que un repetidor es útil pueden ir desde el aumento de capacidad de una celda en un entorno urbano con muy alta densidad de tráfico, a la extensión de cobertura a una zona remota o en el interior de un edificio.

En primer lugar, es posible desplegar repetidores fijos sobre una zona ya cubierta por una red, con el fin de aumentar la capacidad o mejorar la cobertura. Los repetidores tienen la ventaja de ser más sencillos que una estación base y por tanto pueden estar situados por debajo de la altura de un edificio, permitiendo así comunicaciones con línea de vista en casi cualquier punto. Este escenario, denominado infraestructura fija, puede dar acceso a usuarios registrados en la red que pagan por tener un servicio mejor.

En segundo lugar, otro escenario posible es el de proporcionar mejor cobertura en el interior de un edificio. En las redes actuales, incluso con las bajas tasas de tráfico requeridas para voz, la cobertura en el interior de los edificios es en ocasiones muy deficiente. En una red WiMAX, es posible situar un repetidor en el interior de un edificio de forma que con una red celular de grandes dimensiones también sea posible dotar de conectividad a los terminales en el interior de un edificio, suponiendo así una competencia clara para las actuales tecnologías de redes locales inalámbricas.

En tercer lugar, es habitual que en los núcleos urbanos existan momentos en los que se produzcan grandes concentraciones de personas, que generan mucho tráfico mientras dura la concentración. Los

repetidores WiMAX pueden entonces servir para proporcionar tráfico en estas ocasiones, tanto posicionados de forma permanente (por ejemplo cerca de un estadio) como llevados a un punto concreto en cada ocasión. Este escenario se denomina cobertura temporal.

Finalmente, también es posible utilizar un repetidor WiMAX para proporcionar cobertura dentro de un vehículo en movimiento, como un autobús o un tren, que son ocasiones en las que un gran número de personas están ubicadas en poco espacio y se mueven además muy rápido, por lo que tanto la interferencia como el efecto Doppler dificultan la comunicación con la estación base.

#### **4.4. Conclusión**

La enmienda 802.16j define fundamentalmente dos modos de operación, uno para el aumento de la cobertura de las redes (el modo no transparente) y otro para la mejora de su capacidad (modo transparente), incluyendo entre ambas la mayoría de las funcionalidades que se mostraron de forma teórica en el capítulo anterior. Estos modos de operación permiten múltiples configuraciones, lo que ha provocado que en la actualidad exista una amplia comunidad investigando sobre la optimización del despliegue de redes basadas en la tecnología IEEE 802.16j. Gran parte de estas investigaciones están en relación a los potenciales beneficios que proporcionarían los mecanismos definidos en el estándar en situaciones de movilidad.

## 5 Objetivos

Como se ha podido ver en los capítulos anteriores, la operación de WiMAX en bandas no licenciadas por un lado y el uso de repetidores por otro, puede ser muy beneficioso para mejorar las prestaciones de redes que hagan uso de ambas tecnologías en distintos escenarios. La enmienda 802.16j, que cuenta con un amplio respaldo de la comunidad científica, podría haber sido el candidato idóneo para mejorar las posibilidades de despliegues de este tipo de redes en zonas rurales de países en desarrollo. Sin embargo, y como se ha visto, sus desarrolladores han limitado su uso a bandas licenciadas. En este contexto parece pertinente estudiar si existe alguna limitación en la actual definición de la enmienda para que esta tecnología puede operar en estas bandas y, si es así, si existe una solución realista para superarla. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es:

- Realizar un estudio de viabilidad técnica y comercial de la enmienda 802.16j para que se considere su modificación para permitir su operación en la banda no licenciada de 5 GHz que permita ampliar la cobertura y reducir el coste de las redes WiMAX que se pretendan desplegar en zonas rurales de países en desarrollo.

Si el estudio demuestra que es viable tanto técnica como comercialmente, se podrá considerar esta alternativa tecnológica, que cuenta con unas prestaciones técnicas superiores a las que ofrecen en la actualidad las tecnologías existentes, como candidata cuando se valoren las tecnologías que pueden resolver las necesidades de comunicaciones de una zona rural de un país en desarrollo.



**Parte II**

**Metodología**



## 6 Metodología

La metodología seguida para alcanzar el objetivo propuesto en este proyecto es muy sencilla de explicar, pero relativamente compleja de llevar a cabo. Tiene dos pilares fundamentales:

- Conocer cuáles son los requisitos que imponen las agencias de regulación internacionales para el uso de tecnologías inalámbricas en la banda de frecuencias de 5 GHz. Las agencias de regulación consideradas han sido el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R), el Comité Europeo de Radiocomunicaciones (ERC) y la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC, por sus siglas en inglés).
- Realizar una revisión en profundidad de los mecanismos definidos en la enmienda 802.16j para conocer si alguno de ellos tendría alguna limitación en su aplicación en bandas libres.

Una vez que se hayan llevado a cabo estos pasos, se contrastarán ambos para comprobar si existe alguna incompatibilidad entre los requisitos de los reguladores internacionales y los mecanismos definidos en el estándar. En caso de que existieran, se propondrían mecanismos que propusieran soluciones a las incompatibilidades encontradas, de forma que se pueda plantear una propuesta formal y sustentada de modificación de la enmienda 802.16j para que se considere su operación de en la banda no licenciada de 5 GHz.

Aprovechando el nivel de conocimiento detallado que se debe adquirir de la enmienda para poder alcanzar semejante objetivo, también se realizará un diseño de alto nivel de los mecanismos que han de implementar los dispositivos WiMAX (BS y RS) para proporcionar redes multsalto en cada uno de los modos de funcionamiento que define el estándar. Esto es de particular interés para conocer la complejidad que implicaría el desarrollo de cada modo de funcionamiento, lo cual implica un primer paso a la hora de conocer la viabilidad industrial y comercial de este tipo de soluciones. Además, sirve para sentar las bases del módulo 802.16j del simulador de redes heterogéneas desarrollado en el mismo marco de este estudio, el Proyecto Open Reach. En este diseño sólo se indicarán los mecanismos y mensajes a incluir en la MR-BS y en la RS, es decir, los mecanismos que ya se contemplaban en las SS y BS según el estándar 802.16-2009 no serán incluidos.

Para conocer la viabilidad industrial que podrían tener este tipo de soluciones, se ha hecho una búsqueda intensiva de fabricantes que hubieran mostrado interés o hubieran implementado algún prototipo de equipamiento 16j. En este sentido, se ha realizado una búsqueda en Google y se ha consultado por correo electrónico a un alto porcentaje de los miembros del Grupo de Trabajo de Retransmisión que contribuyeron a la elaboración de la enmienda. Además, se ha acudido al WiMAX Forum Global Congress 2010, celebrado en Amsterdam los días 16 y 17 Junio para conocer de primera mano la opinión de los principales actores involucrados en el desarrollo de este tipo de soluciones.

### 6.1. Marco Regulatorio Internacional

La autoridad supranacional que tiene el papel principal en la gestión del espectro radioeléctrico a nivel global es el Sección de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R)[55]. Su principal misión es la de garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica

del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los que emplean órbitas de satélites, así como la de realizar estudios y adoptar Recomendaciones sobre las radiocomunicaciones. En particular, la ITU-R es la encargada de la redacción del Reglamento de Radiocomunicaciones, que, con carácter de Tratado Internacional, sirve de texto básico para la regulación del espectro radioeléctrico en casi la totalidad de los países. Este reglamento sólo puede ser modificado en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicación (WRC), que se celebran cada dos o tres años, y que cuentan con la colaboración de más de 180 países. En concreto, estos Reglamentos de Radiocomunicaciones adjudican un canal radioeléctrico o un bloque de frecuencias concreto a cada zona geográfica del área de planificación.

En el marco europeo, las frecuencias asignadas han de ser atribuidas a servicios. Esta atribución de frecuencias se realiza en la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT), que a través del Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC), se encarga del proceso de armonización en el uso del espectro radioeléctrico en Europa. La ECC se basa para ello en los estudios técnicos orientados a la atribución de servicios a nuevas bandas, compartición de servicios en bandas de frecuencias, o elaboración de Planes de Frecuencias que realiza la Comité Europeo de Radiocomunicaciones (ERC).

En los Estados Unidos el uso del espectro de radiofrecuencia es gestionado a través de dos organismos el Comité Federal de Comunicaciones (FCC) y la Administración Nacional de Información y Telecomunicaciones (NTIA). La primera, actúa bajo la autoridad del Congreso de los Estados Unidos y se encarga de la atribución y asignación de frecuencias a los usuarios no gubernamentales, incluidos por tanto los usuarios de la banda de 5 a 6 GHz, mientras que la segunda lo hace para los organismos dependientes del gobierno.

Además de las recomendaciones de la ITU-R, se ha decidido presentar los requisitos de la ERC y de la FCC puesto que no son únicamente válidos en Europa y Estados Unidos, respectivamente, si no que muchos países en vías de desarrollo que no tienen los medios como para regular todas las frecuencias en un alto nivel de detalle, se basan de los marcos definidos por la CEPT y la FCC; este es el caso de multitud de países latinoamericanos y africanos que asumen como propios los marcos regulatorios norteamericanos.

## 6.2. Consideraciones a la revisión de la enmienda IEEE 802.16j

Al tratarse de una enmienda al estándar 802.16-2009, será necesario también conocer al detalle este documento puesto que lo que proporciona la enmienda es una plantilla para superponer al estándar. El la Figura 6.1 se muestra un ejemplo para aclarar esta afirmación. Como se puede apreciar, en esta sección del estándar se incluyen inserciones de nuevos apartados y cambios en otros, mientras que gran parte del documento original quedaría sin modificar.

Es importante señalar que la enmienda está definida para la operación mediante OFDMA en las bandas licenciadas de 2,3 y 3,5 Ghz para introducir mejoras en la operación de redes con movilidad. Esto implica que la enmienda incluye mecanismos de manejo del handover y de otras características necesarias para la operación con movilidad, que no han sido tenidas en cuenta para este documento. Por los mismos motivos, sólo se describirán los procedimientos a realizar por las SS que utilicen la PHY Wireless-OFDMA.

En este sentido y con el fin de realizar el diseño de alto nivel indicado, se indicarán los mensajes y mecanismos que tendrá que implementar cada estación (RS o MR-BS) para cada modo de funcionamiento. Por lo que durante la revisión de la enmienda será necesario anotar los mensajes que intercambian entre las estaciones (tanto los nuevos, como los ya definidos en 802.16-2009 y utilizados aquí), y sus relaciones entre ellos, y si éstos son opcionales u obligatorios para el desarrollo de un mecanismo determinado.

**6.3.7.4 UL-MAP message**

*Change subclause 6.3.7.4 as indicated:*

The UL-MAP message defines the UL usage on the access zone in terms of the offset of the burst relative to the Allocation Start Time (units PHY-specific).

*Insert new subclause 6.3.7.7:*

**6.3.7.7 R-MAP**

The R-MAP message defines the usage of downlink and uplink intervals on the relay link for the OFDMA-PHY.

The format of R-MAP message is defined in 8.4.5.10.

**6.3.9 Network entry and initialization**

*Change subclause 6.3.9 as indicated:*

Systems shall support the applicable procedures for entering and registering a new SS or a new node to the network. All network entry procedures described hereunder through and including 6.3.9.13 apply only to PMP operation. MR systems shall support the applicable procedures for entering and registering a new RS to the network. All network entry procedures described hereunder through and including 6.3.9.19 apply only to RS.

Figura 6.1: Ejemplo estructura de la enmienda.



**Parte III**

**Resultados**



## 7 Descripción detallada de la enmienda IEEE 802.16j

Este capítulo tiene como objetivo describir en profundidad los mecanismos propuestos por la enmienda IEEE 802.16j para redes de retransmisión multisalto que podrían tener aplicación en una red fija para ampliar su cobertura y su capacidad. Esta enmienda 802.16j define los mecanismos necesarios para poder crear redes de retransmisión multisalto compatibles con el estándar 802.16-2009 a través de la definición de estaciones retransmisoras (RS). Esta compatibilidad permite que las SS existentes puedan operar sin cambios; sin embargo, las BS, como se verá a lo largo del capítulo, tendrán que hacer algunas modificaciones. Por lo que para permitir que se comprenda completamente la funcionalidad de los mecanismos que describe la enmienda, será necesario que, en muchos casos, se describan mecanismos ya existentes en el estándar 802.16-2009.

Si algo caracteriza al estándar 802.16j es la multitud de posibles opciones de funcionamiento que define. Por un lado está la separación entre las RS transparentes y RS no transparentes. Las primeras están pensadas únicamente para la operación en dos saltos y su función es retransmitir los datos de las SS para aumentar la capacidad en una misma celda. Las segundas han sido ideadas para aumentar la cobertura de la red, y por lo tanto tienen que retransmitir información de control y de planificación.

Dicha planificación puede ser a su vez centralizada, donde todos los enlaces de una red son planificados por la Multihop Relay Base Station (MR-BS), o distribuida, donde las RS no transparentes son las encargadas de planificar los recursos de sus estaciones subordinadas. Esto introduce un cambio fundamental en la operación de las redes WiMAX existentes. En las redes punto a multipunto basadas en el estándar 802.16-2009, la única estación capaz de gestionar dichos recursos es la BS. Esto cambia en el estándar 802.16j con la introducción de las RS no transparentes operando en modo de planificación distribuida, ya que éstas podrán también gestionar los recursos de sus estaciones subordinadas. Por lo tanto, según el estándar 802.16j existen dos tipos de estaciones que podrán gestionar los recursos con sus estaciones subordinadas: la MR-BS y las RS no transparentes operando en modo de planificación distribuida. A estas estaciones se les denomina estaciones planificadoras.

Este concepto es distinto del de estación superordinada. Una estación superordinada es aquella de la que una estación recibe sus asignaciones. De esta forma, no sólo las estaciones planificadoras pueden ser superordinadas, si no también las RS no transparentes operando con planificación centralizada. Sin embargo, no todos los tipos de RS pueden ser superordinadas de los demás tipos de RS. Una RS no transparentes centralizada sólo puede tener como superordinada a otra RS no transparente centralizada o a una MR-BS. Lo mismo ocurre con una RS no transparente distribuida, cuyas únicas superordinadas pueden ser otra RS no transparente distribuida o una MR-BS. Las RS-T pueden tener de superordinada a cualquiera de las demás, sin embargo, no pueden ser superordinadas de ninguna.

Además, es importante dejar claro el concepto de estaciones subordinadas, puesto que una RS no transparente operando en modo distribuido siempre será una estación subordinada; ya sea de una MR-BS o de una RS no transparente distribuida que esté por encima de ella en la jerarquía de la red, y al mismo tiempo tendrá estaciones subordinadas a las que gestione sus recursos. Si este dispositivo subordinado se trata de un SS, a la RS superordinada se la llamará, a la vez RS de acceso, mientras que si el dispositivo subordinado se trata de una RS, a su estación superordinada se la denominará RS intermedia.

A parte de estas diferencias en la nomenclatura, una RS no transparente en modo de planificación

distribuida puede, a su vez, operar en modo de seguridad centralizada o distribuida. En el primero la MR-BS es la que gestiona la seguridad de toda la red, por lo que todos los mensajes cifrados tienen que pasar por ella. En el segundo, por contra, la RS gestiona la seguridad de sus estaciones subordinadas. Además, a nivel físico las RS no transparentes, sin importar el modo de planificación que utilicen, se dividen entre aquellas que son capaces de recibir y transmitir simultáneamente (STR) y las que no (TTR).

Por otro lado, y ya fuera de la definición de las estaciones, el estándar propone la creación de conexiones de túnel que transporten información de múltiples conexiones individuales. Por lo que ahora existirá la posibilidad de, o bien continuar utilizando el método de conexiones individuales que ya funcionaba en el estándar fijo (adaptado ahora para la retransmisión a lo largo de múltiples saltos) o utilizar este nuevo método de retransmisión mediante túneles. Además, para conocer el camino por el cuál las RS tienen que enviar un paquete concreto (sea de una conexión individual o de una conexión de túnel) el estándar también define dos mecanismos de señalización: uno embebido y otro explícito.

Las opciones y mecanismos que permiten la operación de las múltiples opciones indicadas han sido descritos en profundidad en los siguientes apartados.

## 7.1. Inicialización de un nodo en la red

El proceso de entrada de una nueva estación, sea SS o RS, en una red 802.16j es un proceso complejo que consta de varias etapas. Es importante mencionar que en el modo de retransmisión multisalto algunas de las etapas que se describen en esta sección son opcionales:

- La autorización e intercambio de claves descrito en la sección 7.1.5 depende de si la estación realizando la inicialización soporta dichos mecanismos.
- La sección 7.1.11 describe el manejo de SS con conexión secundaria activa. Sin embargo, no todas las SS lo contemplan.
- Los apartados 7.1.7, 7.1.8 y 7.1.9 hacen referencia a un modo específico de inicialización de las RS y, por lo tanto, no se llevarán a cabo si no se utiliza este mecanismo.

Si estas etapas han de ser llevadas a cabo o no por lo estación que se inicializa lo indica la estación superordinada dentro de la etapa de alineamiento inicial, tal y como se describe en la sección 7.1.3.

### 7.1.1. Escaneo del canal de bajada y obtención de los parámetros de recepción

Cuando una estación se inicializa en la red, el primer paso que debe realizar es encontrar el canal en el que está operando la red. Para ello ha de escanear todos los canales de su banda de frecuencia hasta que encuentre una señal válida en el canal de bajada (Downlink, DL).

Una vez que la capa física (PHY) haya adquirido sincronización, la capa MAC trata de encontrar los parámetros válidos de operación de la red en el DL. Para ello, la capa MAC tiene que buscar mensajes DL-MAP. Una estación, ya sea SS o RS, logra la sincronización MAC una vez que encuentra un DL-MAP que contiene la información de los perfiles de ráfaga válidos en la red. Además, continua sincronizada mientras reciba DCD y DL-MAP en ese canal. Existen temporizadores que fuerzan a la estación a volver a adquirir la sincronización si ha transcurrido mucho tiempo desde el último mensaje recibido.

#### 7.1.1.1. Primera Fase de Selección de la Estación de Acceso

Dependiendo de la configuración de la red y la distribución de las estaciones, una RS realizando tareas de inicialización puede escuchar información de control de varias estaciones. Para decidirse sobre con

cual llevará a cabo el resto de la inicialización, ha de escuchar el parámetro end-to-end metric del DCD. Este parámetro opcional, que puede tomar valores de 0 a 3, indica el número de saltos entre la estación que lo transmite y la MR-BS. Una vez elegida, continua con el proceso de inicialización en la red.

### 7.1.2. Obtención de los parámetros de transmisión

Una vez sincronizada, la estación que se inicializa en la red ha de esperar la recepción de un UCD dentro del DL que indique el conjunto de parámetros que determinan la operación en el canal de Uplink (UL). Además de éstos, la estación debe continuar recibiendo UL-MAPs dentro de unos intervalos determinados para que la capa MAC considere que sigue sincronizada con la red. El UL-MAP contiene la estructura del canal de UL en el que las estaciones se comunican con su estación superordinada.

### 7.1.3. Realización de alineamiento inicial y ajustes automáticos

Una vez que la estación conoce la estructura de la trama y conoce los parámetros de operación en el UL, la estación inicializándose tiene que conseguir que la estación superordinada tenga constancia de que está activa, para que la tenga en cuenta durante sus asignaciones. Sin embargo, para ser tenida en cuenta, tiene que realizar un proceso de alineamiento inicial durante el cual la estación superordinada realiza las correcciones de temporización y de potencia necesarias para que la nueva estación opere en sincronía con la red. Durante el este proceso la estación inicializándose no puede transmitir por encima de una potencia máxima que relaciona la estimación del canal, la PIRE de la MR-BS y la de la SS<sup>1</sup>, de forma que no cause interferencia en las estaciones que ya operaban en la red.

Para llevar a cabo estos ajuste, la estación superordinada realiza estos ajustes sobre una señales que las estaciones que se inicializan le envían durante un período denominado Alineamiento Inicial (Initial Ranging) que está presente al inicio de la subtrama del UL. Este período está dividido en ranuras de tiempo de un tamaño fijo denominadas Ranuras de Alineamiento. La señal que envía la estación la elige aleatoriamente de dentro de un conjunto de códigos. Este conjunto para las SS y para las RS. Las primeras lo obtienen dentro del campo Initial\_Ranging\_Codes del UCD, mientras que las segundas los obtienen del parámetro RS\_Initial\_CDMA\_Code del UCD. El código elegido se envía en una de las ranuras del intervalo de Alineamiento Inicial, escogida también de forma aleatoria dentro del conjunto de éstas, con la mínima potencia posible.

Si la señal enviada llega a la MR-BS, ésta contestará con un mensaje RNG-RSP haciendo referencia al código y la Ranura de Alineamiento utilizados y le indicará si es necesario algún ajuste (Continue), o si existe algún problema que impida su inicialización (Abort). Si por el contrario, no recibe ningún mensaje, repetirá el proceso aumentando gradualmente la potencia de transmisión hasta el máximo permitido en este proceso.

Si la estación recibe un RNG-RSP:Continue, tendrá que llevar a cabo los ajustes indicados y realizar de nuevo el mismo procedimiento hasta que reciba un mensaje con status Success. Una vez que el ajuste sea el idóneo, la MR-BS asignará a la SS un intervalo en el siguiente UL-MAP denominado CDMA\_Allocation IE (indicando el código y la ranura utilizado por la estación en su última transmisión para que ésta se identifique). Este intervalo sirve para que la SS envíe un mensaje RNG-REQ, que contiene la MAC de la estación y permite a la MR-BS identificarla por ella a partir de ahora.

Ante la recepción de este mensaje, la MR-BS contesta con un mensaje RNG-RSP que contiene los identificadores de conexión (CID) básico y primario de las conexiones que utilizarán la estación y la MR-BS para llevar a cabo tareas de gestión a lo largo de su operación dentro de la red. En el caso de que la estación inicializándose sea una RS, este mensaje también incluye los códigos CDMA que utilizará

---

1

de forma dedicada para realizar otras tareas de gestión que se realicen bajo contienda<sup>2</sup>. Además, en este mensaje se indican las etapas opcionales del proceso de inicialización que se llevan a cabo mediante el campo Network Entry Optimization. También en este mensaje se le comunica a la RS el indicador de camino al que pertenece y los CID de las estaciones que pertenecen a él<sup>3</sup>.

La MR-BS también puede utilizar el proceso de Alineamiento Inicial para hacer correcciones a la frecuencia de operación de la estación subscriptora. Estos cambios pueden servir incluso para indicar a la estación que cambie de canal, siempre y cuando el ajuste indicado sea mayor que la mitad de al ancho del canal utilizado.

### 7.1.3.1. Alineamiento Inicial de una SS en una red con RS no transparente en modo centralizado

En el caso de que una estación quiera realizar su alineamiento inicial en una red con una RS no transparente operando en modo centralizado, el procedimiento de Alineamiento Inicial es muy similar al descrito en la sección 7.1.3. En este caso, sin embargo, la RS no transparente realizará algunas de las funciones que en el escenario anterior realizaba la MR-BS:

- Si la SS necesita ajustes, la RS no transparente tendrá que solicitar ancho de banda en su DL para poder enviar el RNG-RSP a la SS. La MR-BS entonces debe asignar los recursos solicitados en el DL-MAP de la RS no transparente (entre ésta y sus estaciones subordinadas) y se lo notifica mediante un RS\_BW\_ALLOC IE dentro del RS\_Access-MAP.
- De igual forma, cuando la SS no necesite más ajustes, la RS no transparente solicitará recursos para que ésta le envíe su RNG-REQ a la MR-BS.
- Una vez recibido, tendrá que solicitarle recursos a la MR-BS para reenviarle el mensaje<sup>4</sup>.
- Ante la recepción del RNG-REQ, la MR-BS decide si acepta o no a la SS en la red. En caso afirmativo, le envía un RNG-RSP a la RS que contenga los CID de sus conexiones y crea los recursos en su DL-MAP mediante un RS\_BW\_ALLOC IE dentro del RS\_Access-MAP para que ésta se lo envíe a la SS.

### 7.1.3.2. Alineamiento Inicial de una SS en una red con RS no transparente en modo distribuido

En el caso de que una estación quiera realizar su alineamiento inicial en una red con RS no transparente en modo distribuido, el procedimiento a seguir es similar al descrito en la sección 7.1.3, haciendo la RS no transparente las veces de la MR-BS. Sin embargo, existen las siguientes excepciones:

- La RS no transparente puede solicitar permiso a la MR-BS para aceptar una SS dentro de la red. Para ello, antes de enviar a la SS un CDMA\_Allocation IE, enviará a la MR-BS una cabecera MR Code-REP para indicarle que hay una nueva SS que quieren entrar en la red. A esto, la MR-BS le contesta con un mensaje RNG-RSP indicándole el número de SS nuevas que permite que entren en la red mediante el parámetro Number\_of\_Accepted\_SS.
- En el caso en el que la estación superordinada se trate de un RS no transparente funcionando en modo de asignación local de CID, ésta será la encargada de proporcionarle los CID de sus

<sup>2</sup>Consultar la sección 7.4.6 para más información.

<sup>3</sup>Consultar la sección 7.5.1 para más información.

<sup>4</sup>Los procesos de solicitud de recursos se describen mayor detalle en la sección 7.2.1.8.

conexiones básica y primaria. Si no, una vez que haya recibido un RNG-REQ de la SS tendrá que reenviárselo a la MR-BS para que ésta cree el RNG-REP con los CID básico y primario de la SS.

### 7.1.3.3. Alineamiento Inicial de una SS en una red con RS transparentes

Como se describió en la sección 7.1.3, la SS ha de enviar un código de alineamiento dentro de una ranura de alineamiento, elegidos ambos de forma aleatoria. La diferencia es que en este sistema dicho código será recibido, no sólo por la MR-BS, si no también por una o varias RS transparentes. Ante la recepción del código:

- Las RS transparentes han de enviar un MR\_RNG-REP a la MR-BS indicándole la señal recibida de la SS, así como los ajustes que ésta debería llevar a cabo para alinearse con ella.
- La MR-BS, por su parte, ha de calcular también dichos ajustes, y compararlos con los que reciba en los MR\_RNG-REP para elegir la estación a través de la cual se conectará la SS a la red. Si hacen falta ajustes, será la MR-BS a través de un RNG-RSP la que se lo indique a la SS.

Al igual que en el caso general, una vez terminados los ajustes, la MR-BS le proporciona a la SS un CDMA\_Allocation IE dentro del UL-MAP para que envíe su RNG-REQ. En el caso de que el camino elegido pase por una RS transparente, el CDMA\_Allocation IE estará asociado a un UL\_Burst\_Receive dirigido al CID de la RS, para que ésta sepa cuando recibir el mensaje de la SS. Una vez recibido el RNG-REQ, se lo reenviará a la MR-BS en la siguiente asignación en el UL que tenga disponible. Una vez recibido, la MR-BS enviará directamente un RNG-RSP a la SS que contenga sus CID básico y primario para finalizar su alineamiento inicial.

**7.1.3.3.1. RS transparentes conectadas con RS no transparentes** En este caso las RS no transparentes harán las veces de MR-BS, y el procedimiento a seguir será muy similar al descrito en el apartado 7.1.3.1 para las RS centralizadas y en 7.1.3.2 para las distribuidas. En este caso, la diferencia reside en que son éstas las que le tienen que indicar a la RS transparente cuándo recibir el RNG-REQ de la SS y proporcionarle recursos para que se lo retransmita, tal y como se describió en el apartado 7.1.3.3

### 7.1.3.4. RS realizando el Alineamiento Inicial

Cuando una RS está llevando a cabo el alineamiento inicial, todos los mecanismos descritos con anterioridad para las SS también serán aplicables en este caso considerando las siguientes excepciones:

- Si la RS recibe códigos de alineamiento inicial específicos para ella, deberá utilizarlos en lugar de los genéricos.
- Cuando una MR-BS o una RS no transparente reciben un código de alineamiento inicial específico para RS, pueden enviar a la RS un RNG-RSP:Abort indicándole los índices de preámbulo de la RS con la que debe inicializarse<sup>5</sup>. Ante esto, la RS debe reiniciar el proceso de inicialización, escaneando esta vez lo recibido en busca de dichos índices de preámbulo.
- Si una RS Transparente recibe códigos específicos de otra RS, los descarta.

<sup>5</sup> Consultar el apartado 7.1.8 para más información.

#### 7.1.4. Negociado de capacidades básicas

Después de haber finalizado el alineamiento y haber adquirido los CID de sus conexiones básica y primaria, la estación inicializándose, ya sea SS o RS, debe comunicar a la MR-BS aquellas opciones de operación básica que soporta mediante el mensaje SBC-REQ. Ante la recepción de este mensaje la MR-BS responde con un mensaje SBC-RSP donde sólo indica aquellas opciones que soporta la red.

Las opciones de operación básica son aquellas que necesita el proveedor de servicios de red para comunicarse con la estación. Entre éstas destacan: los intervalos entre transmisión y recepción (SSTTG y SSRTG) y las potencias máximas que puede utilizar con cada modulación. De forma específica para OFDMA, en este mensaje se indican el número de subportadoras FFT soportadas, las modulaciones que puede utilizar en transmisión y recepción, los modos de permutación permitidos, si se soportan MIMO, AAS y HARQ y con qué características, y otras opciones relativas al control de potencia y a la medición del canal.

Con la inclusión de las RS, la funcionalidad de este mensaje ha sido ampliada y en él las RS incluyen las opciones físicas que soportan, como: diversidad cooperativa, zona directa de retransmisión en el DL, utilización de segunda portadora, etc.

Las RS tienen que hacer llegar hasta la MR-BS, los SBC-REQ provenientes de estaciones subordinadas, por lo que tendrán que solicitar recursos a sus superordinadas para hacerlo<sup>6</sup>. Además, si se trata de una RS no transparente con planificación distribuida operando en modo de asignación local de CID, al retransmitir el SBC-REQ le tiene que decir a la MR-BS qué CID le ha asignado a sus SS subordinadas y la MAC de éstas.

#### 7.1.5. Autorización e intercambio de claves

El siguiente paso para la entrada de una estación en la red es su autorización en la misma. Este proceso se lleva a cabo a través de intercambios de claves que forma parte del protocolo de seguridad de WiMAX y no será descrito en profundidad en este documento. Indicar, eso sí, que existen dos arquitecturas de seguridad: una denominada centralizada, donde la MR-BS gestiona las claves de todas las estaciones de la red (sean SS o RS), y una denominada distribuida donde determinadas RS no transparentes operando con planificación distribuida, se encargan del intercambio y gestión de las claves de sus estaciones subordinadas.

#### 7.1.6. Registro

El registro es el procedimiento a través del cual se le permite a una SS o RS pasar a formar parte de la red. Para llevar a cabo el registro la estación debe enviar a la MR-BS un mensaje REG-REQ. Si comprueba que está autorizada en la red, ésta contesta con un mensaje REG-RSP.

Además, en esta etapa las SS que lo requieren reciben el CID de su conexión secundaria, lo que permite que la MR-BS maneje dichas SS de una forma más eficiente<sup>7</sup>. En este caso, el REG-RSP contiene el CID de su conexión secundaria.

Dentro del REG-REQ, la estación incluye información adicional sobre las opciones de operación que soporta. Entre ellas están: la cantidad de conexiones de transporte, las características de su subcapa de convergencia, el soporte de ARQ, la máxima cantidad de datos que es capaz de manejar simultáneamente o las cabeceras y subcabeceras MAC que se pueden utilizar. Cuando la MR-BS envía su respuesta, ésta contiene aquellas opciones que son soportadas dentro de la red. Si la MR-BS tiene aprovisionadas conexiones de transporte para dicha estación, en este mensaje le indica de cuántas se trata.

---

<sup>6</sup>El proceso de solicitud de recursos se detalla en el apartado 7.2.1.

<sup>7</sup>Para mayor información sobre este proceso consultar el apartado 7.1.11.

Con la inclusión de las RS, la funcionalidad de este mensaje ha sido ampliada y en él las RS incluyen las opciones de operación que soportan, como: modo de planificación, modo de seguridad, asignación local de CID, soporte de túneles, etc.

Las RS tienen que hacer llegar hasta la MR-BS los REG-REQ provenientes de estaciones subordinadas para que la MR-BS registre a todas las estaciones operando en su red (incluso si se trata de RS operando en modo de asignación local de CID), por lo que tendrán que solicitar recursos a sus superordinadas para hacerlo<sup>8</sup>. En el caso de las RS no transparentes operando en modo de seguridad distribuida, éstas pueden comprobar si la estación está autorizada en la red antes de reenviar el mensaje a la MR-BS. Si no lo está, contestan ellas directamente.

### 7.1.7. Primera Fase de Selección de la Estación de Acceso

Este apartado y los subsiguientes únicamente aplican a la inicialización de las RS. El siguiente paso de la inicialización de una SS se describe en el apartado 7.1.11.

La MR-BS puede solicitar a la RS, dentro del mensaje RNG-RSP, que realice medidas sobre la señal que recibe de sus vecinos. Esta medida se realiza sobre la señal recibida de cada vecino, identificado por sus índices de preámbulo de las RS no transparentes de su alrededor. Como ya se ha indicado este proceso es opcional y pese a que su realización permite optimizar la estructura de la red, en casos de despliegues rápidos, puede retrasar dicho proceso.

Si esta etapa es solicitada por la MR-BS, ésta tiene que indicar a la RS que mecanismo utilizar para llevar a cabo las medidas mediante un mensaje RS\_Config-CMD<sup>9</sup>. Una vez realizada la medida, la estación le envía los datos a la MR-BS dentro de un mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP. La información contenida en este mensaje será utilizada por la MR-BS en la Segunda Fase de Selección de la Estación de Acceso.

### 7.1.8. Segunda Fase de Selección de la Estación de Acceso

Si dentro del RNG-RSP la MR-BS indica que este procedimiento opcional ha de llevarse a cabo, éste se realiza después del envío del RS\_NBR\_MEAS-REP y antes de la configuración de la RS. En esta etapa la MR-BS indica a la RS cuál será su estación de acceso dependiendo de la información recibida en el mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP.

Se puede dar el caso de que la MR-BS decida cambiar la estación de acceso que está utilizando la RS. En ese caso, la MR-BS le envía un RS\_AccessRS-REQ indicándole el preámbulo de la RS a través de la cual ha de conectarse a la red. Si existen estaciones intermedias, tendrán que reenviar este mensaje, por lo que tendrán que solicitar recursos a sus superordinadas para hacerlo<sup>10</sup>. Ante esto la RS tiene que confirmar la recepción mediante un MR\_Generic-ACK y repetir la entrada en la red con dicha RS como primera candidata para conseguir su acceso.

### 7.1.9. Creación de caminos y establecimiento de túneles

Una vez que una estación ha realizado su entrada en la red a través de la estación de acceso indicada por la MR-BS, se pueden llevar a cabo tareas de creación de caminos y establecimiento de túneles, para posteriormente asignar dichos túneles a caminos concretos.

Los túneles pueden ser creados entre la MR-BS y cualquier RS de acceso. Éstos sirven para transportar relay MAC PDUs de una o más conexiones entre las estaciones indicadas y pueden atravesar una o

<sup>8</sup>El proceso de solicitud de recursos se detalla en el apartado 7.2.1.

<sup>9</sup>Los mecanismos descritos para medir dicha señal se encuentran en la sección en 7.5.5.

<sup>10</sup>El proceso de solicitud de recursos se detalla en el apartado 7.2.1.

varias RS intermedias. Los túneles pueden ser de dos tipos: gestión o transporte. Los primeros sólo contienen mensajes de gestión, mientras que los segundos llevan datos de los usuarios. En esta etapa de la inicialización, los túneles creados sólo pueden tratarse de túneles de gestión o de túneles únicos de datos<sup>11</sup>.

Los caminos se crean para que las RS sepan quién es la siguiente estación en la ruta hacia la estación destino. El estándar define un mecanismo embebido y otro implícito para la señalización de estas rutas<sup>12</sup>.

### 7.1.10. Configuración de los parámetros de operación de la RS

En esta etapa de la inicialización la MR-BS envía un RCD a la RS en el que le indica las características físicas del canal de retransmisión, y un RS\_Config-CMD que contiene la configuración de los parámetros de operación de la RS. Este mensaje contiene: su modo de operación (centralizado, distribuido), las opciones que puede utilizar (incluido el uso de distintas frecuencias) o los índices de preámbulo y r-ámbulo que utilizarán para identificar sus transmisiones. Este mensaje, además, incluye el parámetro Frame Action Number, que indica a la RS a partir de qué trama ha de comenzar a operar con dichos parámetros. En el caso de enviárselo a una RS en modo de asignación local de CID, este mensaje contiene los rangos de CID que ésta puede asignar.

Una vez configurada, antes de comenzar a transmitir la RS debe sincronizarse con su estación superordinada y debe conocer la estructura para saber en qué momento comunicarse con su superordinada y con sus subordinadas. Sin embargo, no son comunes a todas las RS y dependen de la naturaleza su capa PHY<sup>13</sup>. Para obtener la estructura de la trama:

- Una TTR RS primero obtiene la ubicación del R-FCH/R-MAP gracias al RS\_Config-CMD (que puede contener también la estructura de la trama) y los decodifica dentro de la zona de Relay.
- Una STR RS debe recibir el R-MAP de su estación superordinada en la zona de Acceso, o, si coexiste con una TTR RS, en la de Relay.
- Una RS transparente debe recibir el R-MAP de su estación superordinada en la zona de Acceso.

Para mantener la sincronización:

- Una TTR RS lo hace con el r-ámbulo de su superordinada.
- Una STR RS lo hace con preámbulo de comienzo de trama o el R-ámbulo de su superordinada.
- Una estación transparente mediante la escucha del preámbulo de su superordinada.

Una vez operativa, una RS no transparente debe comenzar a transmitir su trama en aquella indicada por el Frame Number Action, teniendo siempre en cuenta el RS Frame Offset. Este valor indica la número de tramas de diferencia que ha de esperar la estación subordinada para poner en práctica lo indicado en cada mensaje enviado por su superordinada.

### 7.1.11. Gestión de las estaciones con conexión secundaria

Aquellas estaciones a las que se haya proporcionado una conexión secundaria han de llevar a cabo los siguientes mecanismos para completar su entrada en la red.

<sup>11</sup>Para más información al respecto, se recomienda consultar los apartados 7.3.2 y 7.3.4.2.

<sup>12</sup>Estos mecanismos son definidos en el apartado 7.5.1.

<sup>13</sup>Para más información sobre los tipos de RS se recomienda consultar la sección 7.4

Lo primero que han de hacer es solicitar una dirección IP con la cual operar, para ello deberá solicitar una mediante DHCP. En la respuesta del servidor de DHCP se le indica la dirección del Servidor de Configuración con el que debe comunicarse y el nombre de su fichero de configuración.

Una vez obtenida la dirección IP, la SS debe descargarse su fichero de configuración usando TFTP. Una vez finalizado este proceso la estación debe comunicárselo a la MR-BS mediante el mensaje TFTP-CPLT, a lo cual ésta responde con un TFTP-RSP, confirmando la llegada del primero.

A través de la conexión secundaria la estación debe ser capaz de comunicarse con el Servidor de Horario y establecer el horario correcto.

### 7.1.12. Establecimiento de las conexiones aprovisionadas

Una vez finalizado el registro y obtenido el fichero de configuración (para aquellas estaciones gestionables), se establecen las conexiones preaprovisionadas en el caso de que existan. Para ello la MR-BS debe enviar mensajes DSA-REQ para establecer los flujos de servicio preaprovisionados para dicha estación. Este mensaje contiene las características de QoS para dichos flujos, así como su CID. A este mensaje, la SS responde con un mensaje DSA-RSP confirmando las características definidas en el DSA-REQ.

Es importante indicar en este apartado que pese a que el estándar no define como opcional este paso, se puede dar el caso de que una estación no tenga conexiones preaprovisionadas e inicie ella misma el proceso con posterioridad.

El concepto de aprovisionamiento de CID tal y como ocurre con las SS no se da cuando las RS se inicializan puesto que éstas no disponen de datos propios que introducir a la red (únicamente información de gestión, o la reenviada de las SS). Lo único que la MR-BS puede crear con una RS cuando esta se inicializa es “el túnel único”, sin parámetros de QoS asociados a él, y el túnel de gestión, como ya se indicó en 7.1.9.

A partir de que existen CID de datos admitidos en la red, las SS pueden comenzar a enviar la información de las aplicaciones que quieran comunicarse a través de ella utilizando WiMAX.

## 7.2. Mecanismos de solicitud y gestión de ancho de banda

En WiMAX la capa MAC está orientada a conexión y la provisión de QoS se realiza a través de un mecanismo denominado *Grant/Request*, donde las SS solicitan los recursos que necesitan (Request) para cada conexión y la BS decide, en función del ancho de banda disponible y las características de QoS de cada conexión, cuánto asigna a cada SS (Grant).

Por lo tanto, las asignaciones de recursos en WiMAX se realizan después de que la estación subordinada haya solicitado ancho de banda para alguna de sus conexiones<sup>14</sup>. Cabe destacar que, a priori, únicamente dos tipos de estaciones pueden realizar solicitudes: las SS y las RS no transparentes operando en modo distribuido. Salvo en casos excepcionales, las RS operando en modo centralizado no tienen que realizar solicitudes puesto que, en primer lugar, no generan tráfico de datos y, en segundo lugar, la MR-BS debe conocer en todo momento sus necesidades. Las RS no transparentes distribuidas tampoco generan tráfico de datos, pero en su caso, al planificar los recursos de sus estaciones subordinadas, la MR-BS no conoce sus necesidades, por lo que tendrán que solicitar recursos en el UL para poder retransmitir sus datos.

En WiMAX existen distintos mecanismos tanto de solicitud como de asignación de recursos. En las siguientes secciones se describirán todos ellos.

<sup>14</sup>Excepto para el caso de las conexiones gestionadas por el servicio de planificación UGS, al cual se le asignan intervalos de transmisión en el uplink para cumplir con sus estrictos requerimientos de QoS

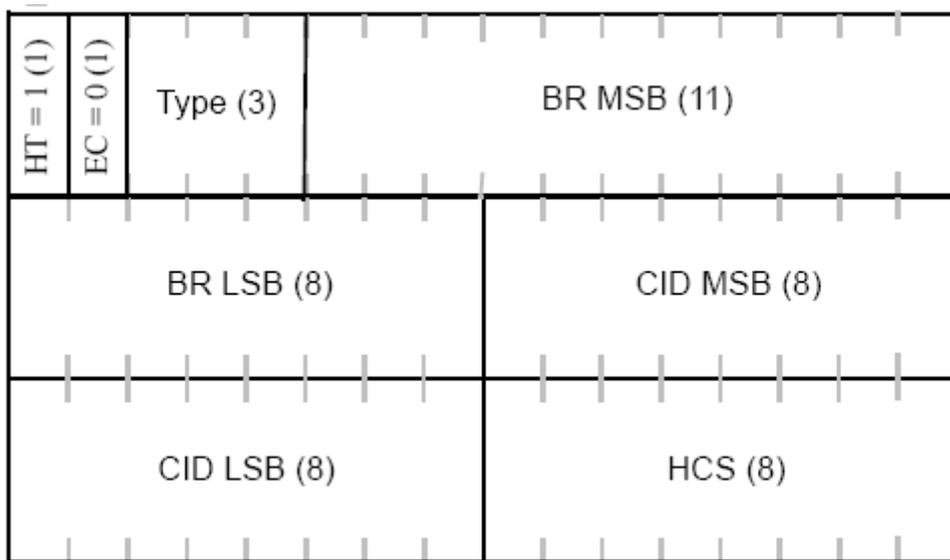


Figura 7.1: Cabecera de petición de ancho de banda.

### 7.2.1. Solicitudes

Las solicitudes definen el mecanismo a través del cual las estaciones se encargan de comunicarle a su estación superordinada que necesitan ancho de banda para una de sus conexiones.

Dado que las condiciones del canal, y por lo tanto los recursos necesarios para transmitir la misma cantidad de datos, pueden variar dinámicamente, las solicitudes hacen referencia al número de bytes que se quieren transmitir, incluyendo los datos y la cabecera MAC.

Según el estándar, las solicitudes pueden ser de cinco tipos: venir en forma de una Cabecera de Solicitud de Ancho de Banda (BR), incluidas en la Subcabecera de Gestión de Asignaciones (PB), o en forma cabeceras RS BR, MS Code-REP o Tunnel BR. Las primeras pueden ser utilizadas tanto por SS como por RS no transparentes de cualquier tipo, mientras que las segundas, al ser peticiones embebidas dentro de paquetes de datos, únicamente pueden ser utilizadas por las SS. Las tres últimas son específicas de las RS. En concreto, las cabeceras RS BR y MS Code-Rep, son específicas de las RS planificadas centralizadamente, mientras que las cabeceras Tunnel son específicas de las RS planificadas de forma distribuida. A continuación se describe cada una de ellas.

#### 7.2.1.1. Cabecera de Solicitud de Ancho de Banda

Las Cabeceras de Solicitud de Ancho de Banda son el mecanismo principal para solicitar recursos en redes WiMAX. Como se puede apreciar en la Figura 7.1, el formato de la de la cabecera es muy sencillo: indica la cantidad de bytes que quiere (campo BR) y para qué conexión los quiere (campo CID). Los campos HT y EC permiten diferenciarla de la cabecera genérica MAC, y el campo HCS permite comprobar si la cabecera contiene errores. El campo Type indica si la solicitud es incremental o agregada.

Cuando la estación superordinada recibe una solicitud incremental debe aumentar esa cantidad de datos a su percepción actual de las necesidades de esa conexión. En el caso de recibir una agregada, la estación superordinada sustituye su percepción actual por la recibida. Para aumentar la eficiencia, las solicitudes suelen ser incrementales, es decir, una estación subordinada pide más ancho de banda para una conexión dada. Sin embargo, para que este mecanismo funcione correctamente, cada cierto tiempo

las peticiones deben ser agregadas, es decir, la SS informa a la estación superordinada del ancho de banda total que necesita, lo que permite a la estación superordinada actualizar sus datos sobre una SS dada y no perder sincronismo.

Pese a que el tamaño de este mensaje es muy corto (48 bytes), la estación planificadora ha tenido que previamente asignar recursos a las estaciones subordinadas para que éstas pueden transmitírselo. Existen distintos mecanismos para obtener los recursos necesarios para la transmisión de solicitudes: desde sondeos periódicos iniciados por la estación planificadora, a transmisiones bajo contienda para indicarle a la estación planificadora que necesita enviarle una solicitud. Estos mecanismos se describen en la sección 7.2.1.6.

### 7.2.1.2. Solicitud de Ancho de Banda dentro de una trama de datos

El estándar ofrece, además, la posibilidad de utilizar las tramas de datos para la solicitud de recursos. Esto se lleva a cabo utilizando la Subcabecera de Gestión de Asignaciones y se denomina Piggybacking (PB).

PB es una manera ligera de adjuntar una solicitud de recursos sin tener que esperar a que la estación planificadora asigne recursos a las estaciones para que puedan enviar sus BR. PB cumple una función distinta dependiendo del servicio de planificación que se utilice para manejar los datos de la conexión que indica el CID que aparezca en la Cabecera Genérica MAC<sup>15</sup>.

- Si el CID de la Cabecera Genérica MAC indica una conexión que está planificada mediante UGS, entonces la Subcabecera de Gestión de Asignaciones tiene el formato indicado en la Figura 7.2.

Syntax	Size (bit)	Notes
Grant Management Subheader {	—	—
if (scheduling service type == UGS) {	—	—
<b>SI</b>	1	
<b>PM</b>	1	
<b>FLI</b>	1	—
<b>FL</b>	4	—
<i>Reserved</i>	9	Shall be set to zero
} else if (scheduling service type == Extended rtPS) {	—	—
<b>Extended piggyback request</b>	11	—
<b>FLI</b>	1	—
<b>FL</b>	4	—
} else {	—	—
<b>PiggyBack Request</b>	16	—
}	—	—
}	—	—

Figura 7.2: Formato de la Subcabecera de Gestión de Asignaciones.

El indicador de error (SI) se usa para que una estación informe a la estación planificadora que el buffer encargado de dar un servicio en el uplink se ha llenado, normalmente debido a la tasa de

<sup>15</sup>Para mayor información sobre los servicios de planificación se recomienda leer la sección 7.3.

Name	Length (bit)	Description
Data delivery service type	3	0: UGS; 1: RT-VR; 2: NRT-VR; 3:BE; 4:ERT-VR; 5-7: <i>Reserved</i>
Priority	3	Priority defined in 11.13.5
BR	12	Requested amount of bandwidth (128 byte/bit)
CID	16	Tunnel CID which requires the bandwidth
HCS	8	Header check sequence (same usage as HCS entry in Table 5)

Figura 7.3: Estructura de la Cabecera Tunnel BR.

llegada de datos. Ante esto, la estación planificadora puede asignar más recursos a esa conexión para que envíe datos de una forma más rápida que con la tasa que tenía garantizada.

Cuando se usa el servicio de planificación UGS, las garantías se producen de forma implícita y regular, ya que la tasa de datos sobre una conexión se presupone que está en sincronía con las necesidades de la tasa de datos del flujo de servicio que se transporta. Por lo tanto, el bit SI se usa para solicitar un poco más de ancho de banda en ocasiones muy puntuales para mantener la tasa de la conexión en sincronía con la tasa de datos.

El bit de poll-me (PM, sondéame) se usa para indicar a la estación planificadora que la estación quiere ser sondeada para solicitar ancho de banda para otra de sus conexiones<sup>16</sup>

- Si el CID ha de ser tratado con ertPS el campo Extended piggyback request hace referencia al nuevo tamaño de asignaciones que la SS solicita a la MR-BS.
- Para CID tratados con rtPS, nrTPS o BE el formato de subcabecera es el presentado en la Figura 7.2.

Como se puede apreciar la solicitud de PB es un campo de 16 bits que representa el número de bytes solicitados para la conexión a la que hace referencia la Cabecera Genérica. Además, al no existir campo Type, las solicitudes de ancho de banda mediante PB siempre se consideran como incrementales.

### 7.2.1.3. Solicitud de Ancho de banda mediante la Cabecera Tunnel BR

En el caso de que exista un único túnel de datos entre la MR-BS y la RS de acceso, las RS pueden utilizar la Tunnel BR Header para solicitar ancho de banda para una conexión de túnel en el enlace de retransmisión hacia la MR-BS. El formato de la cabecera Tunnel BR se muestra en la Figura 7.3<sup>17</sup>.

### 7.2.1.4. Solicitud de ancho de banda mediante la Cabecera RS BR

La cabecera RS BR puede ser enviada por una RS no transparente operando en modo centralizado para solicitar a la MR-BS ancho de banda para transmitir mensajes de gestión compuestos por ella a sus estaciones subordinadas (RNG-RSP, UCD, DCD, etc). Como se muestra en la Figura 7.4, en esta

<sup>16</sup>Para más información sobre los sondeos consultar la sección 7.2.1.6.1.

<sup>17</sup>Para mayor información sobre el uso de esta cabecera se recomienda consultar la sección 7.3.4.2.

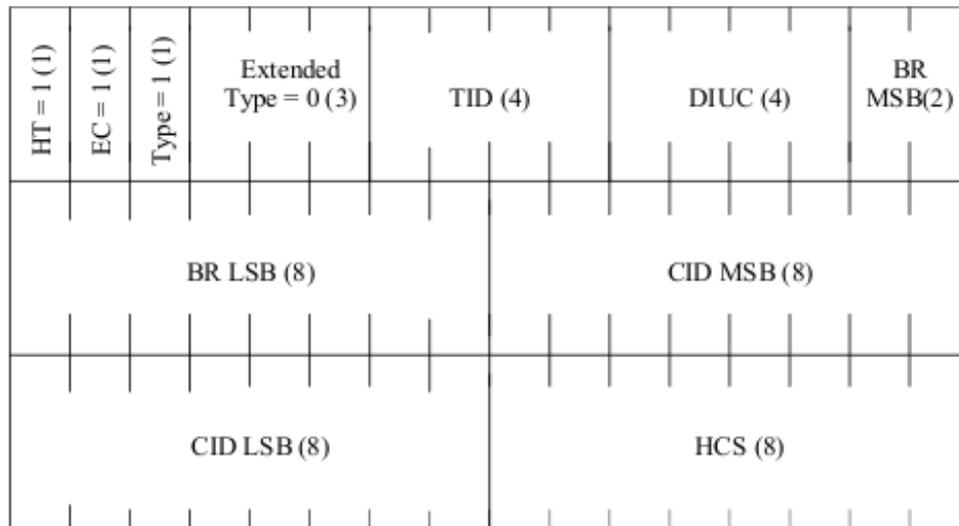


Figura 7.4: Estructura de la Cabecera RS BR.

cabecera se indica la cantidad de bytes que necesita transmitir en el campo BR y el perfil de ráfaga que utiliza con su estación subordinada en el campo DIUC. Para identificar el proceso para el cual solicita recursos, esta cabecera incluye un identificador de transacción (TID).

#### 7.2.1.5. Solicitudes de ancho de banda mediante la Cabecera MS Code-REP

La cabecera MS Code-REP es utilizada por una RS no transparente centralizada para solicitar a la MR-BS que genere tantos CDMA\_Allocation\_IE “vacíos” como códigos CDMA haya recibido de sus subordinadas, para que ella misma los rellene y los incluya en su DL-MAP.

#### 7.2.1.6. Intervalos de Solicitud

Para poder enviar las solicitudes de recursos, las estaciones subordinadas necesitan previamente haber obtenido recursos para su transmisión. Estos recursos se describen como intervalos de solicitud. Los intervalos de solicitud pueden ser asignados por decisión propia de la estación planificadora (sondeos) o mediante petición de una estación, ya sea SS o RS, (Solicitud CDMA). A continuación, se describen ambos mecanismos.

**7.2.1.6.1. Sondeos** Sondear es el proceso a través del cual la estación planificadora asigna recursos a sus estaciones subordinadas para que puedan realizar sus peticiones de recursos. Dichas asignaciones se pueden hacer de forma individual (todas las PHY) o en grupo (sólo SC y OFDM), en cuyo caso entrarían en contienda para realizar su solicitud. Como el modo de retransmisión sólo está definido para OFDMA, en este apartado sólo describiremos los sondeos individuales (pollings).

El uso de secuencias de sondeos simplifica el acceso y garantiza que las aplicaciones reciban el servicio de una forma determinista. Por lo general, las aplicaciones de datos son tolerantes al retardo, pero las aplicaciones de tiempo real, como las de voz y vídeo, requieren servicios más uniformes y algunas veces con un temporizador muy controlado. Es por ello que los sondeos van dirigidos a estaciones (mediante su CID básico) y no a conexiones determinadas, para que sean las SS quienes decidan.

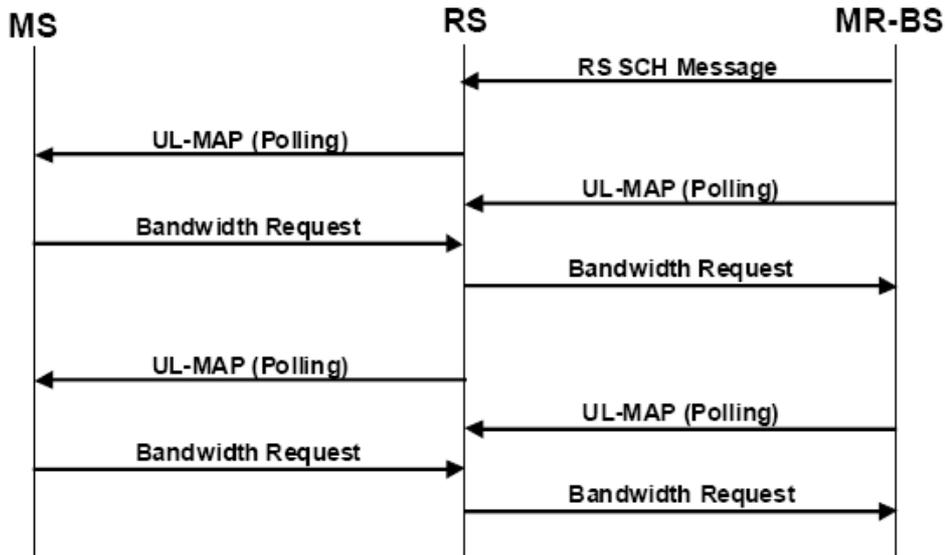


Figura 7.5: Sondeos en redes multisalto.

Los sondeos individuales, además, se usan para estaciones inactivas o para aquellas activas que explícitamente han solicitado ser interrogadas<sup>18</sup>. A éstas se les asigna directamente un intervalo en el UL, mediante un IE dentro del UL-MAP, durante el cual pueden realizar su petición. Si una estación inactiva no quiere solicitar recursos, responde con una petición de 0 bytes.

**Sondeos en redes multisalto** Ante la posibilidad de que existan redes de más de dos saltos, se puede dar el caso de que las estaciones planificadoras tengan que sondear a RS.. En este caso, el proceso es muy similar al descrito hasta ahora. Además, para reducir el retardo las estaciones planificadoras pueden comunicar a sus subordinadas cuándo serán sondeadas para que a éstas les de tiempo a sondear a sus subordinadas de forma que cuando las primeras sean sondeadas sepan las necesidades de sus subordinadas. Este proceso se describe en la Figura 7.5.

**7.2.1.6.2. Solicitudes CDMA** Los códigos CDMA se utilizan en la PHY OFDMA para distintas tareas, entre ellas la petición de recursos para enviar una solicitud. Para ello, la estación planificadora asigna en la inicialización del nodo distintos grupos de códigos a cada una de las distintas tareas<sup>19</sup>.

Cuando una estación tiene datos que transmitir, y no tiene recursos, seleccionará aleatoriamente un código y lo enviará en uno de las ranuras de Alineamiento designados para la transmisión de solicitudes CDMA. Esta ranura, a su vez, habrá sido seleccionado de forma aleatoria entre todos los existentes dentro del subintervalo.

Si no se ha producido ninguna colisión y la estación planificadora recibe correctamente el código CDMA, ésta debe asignar recursos en el UL para que la estación que ha enviado el código realice su petición. Como la estación planificadora desconoce la estación que ha enviado el código, la asignación se realiza mediante el CDMA\_Allocation IE, un IE broadcast que incluye el código, la ranura y la trama utilizados por la estación, para que ésta se identifique.

<sup>18</sup>A través del bit de Poll-Me descrito en la sección 7.2.1.2.

<sup>19</sup>Para más información se recomienda consultar la sección 7.4.6.

Como se puede apreciar este mecanismo ahorra bastantes recursos puesto que lo que se envía para solicitar ancho de banda son una serie de subportadoras moduladas, no un mensaje entero, con sus cabeceras y CRC.

**Solicitudes CDMA en retransmisores con planificación centralizada** Si la estación planificada centralizadamente se trata de una estación no transparente centralizada, ésta, al recibir uno o varios códigos en una trama, reenviará la información a la MR-BS dentro de una cabecera MR Code-REP<sup>20</sup>. La MR-BS tendrá en cuenta la información recibida e incluirá en la planificación del DL de la estación no transparente tanto CDMA\_Allocation IE como códigos CDMA recibió. Como para ahorrar recursos la cabecera MR code-REP no contiene la datos que permiten identificar a la estación que lo envió, la estación planificadora asigna un CDMA\_Allocation IE vacío, que será rellenado por la estación no transparente con los datos correspondientes a cada SS.

Si se trata de una estación transparente, ésta le envía toda la información a la estación planificadora, incluyendo el código y la ranura utilizada, en el mensaje MR\_RNG-RSP. Esto se debe a que las estaciones transparentes no se comunican con sus subscriptoras en el DL, la que lo hace es la estación planificadora. Si ha recibido varios y no el mensaje completo no le cabe en los recursos que tiene asignados, incluye en el campo Size of Remaining CDMA Codes el número de bytes de información que le quedan por enviar relativos a este proceso.

#### 7.2.1.7. Gestión de solicitudes en redes operando con planificación distribuida

De las distintas solicitudes que pueden llegar a una RS no transparente con planificación distribuida, sólo las PB pueden llegar encriptadas. Como hay dos tipos de RS no transparentes: las que pueden descifrar y las que no, dependiendo de cuál se trate, se operará de una forma u otra.

Si se trata de un RS capaz de descifrar, será ella misma la encargada de continuar el proceso y asignar recursos, si procede, a la estación subordinada. En caso contrario, deberá reenviársela a la MR-BS para que ésta descifre el mensaje. Para contestarla, la MR-BS utiliza el mensaje MR\_PBRR\_INFO, que contendrá la Subcabecera de Gestión de Asignaciones descifrada. Para no acumular retardo en las conexiones de la estación subordinada, la RS puede asignar recursos de manera temporal.

Otra medida para reducir el retardo consiste en la anticipación de recursos. Si la RS sabe que le van a llegar este tipo de solicitudes encriptadas de sus subordinadas, puede solicitar ancho de banda a la MR-BS, para que el tiempo entre que la llegada de la solicitud de su subordinada y la asignación de recursos para poder retransmitírsela a la MR-BS se minimice. Este proceso se describe en la Figura 7.6.

#### 7.2.1.8. Gestión de solicitudes en redes operando con planificación centralizada

En sistemas operando con planificación centralizada todas las decisiones de planificación son tomadas por la MR-BS. Por lo tanto, todas las solicitudes que lleguen a un RS con planificación centralizada tienen que ser reenviadas hacia la MR-BS. En caso de que la RS no tenga suficientes recursos en su UL, se lo tendrá que solicitar a la BS mediante el envío de códigos CDMA. Esto es una excepción porque, por regla general, las RS no transparentes centralizadas no realizan solicitudes a la MR-BS puesto que ésta conoce las asignaciones que ha realizado a las SS y por lo tanto los recursos que necesitará la RS para retransmitirlos. La otra excepción se da cuando estas RS tiene que enviar determinados mensajes de control a sus estaciones subordinadas. En este caso hacen uso de solicitudes mediante cabeceras RS BR y MS Code-REP, descritas en los apartados 7.2.1.4 y 7.2.1.5, respectivamente.

<sup>20</sup>Para mayor información sobre la cabecera, consultar la sección 7.2.1.5

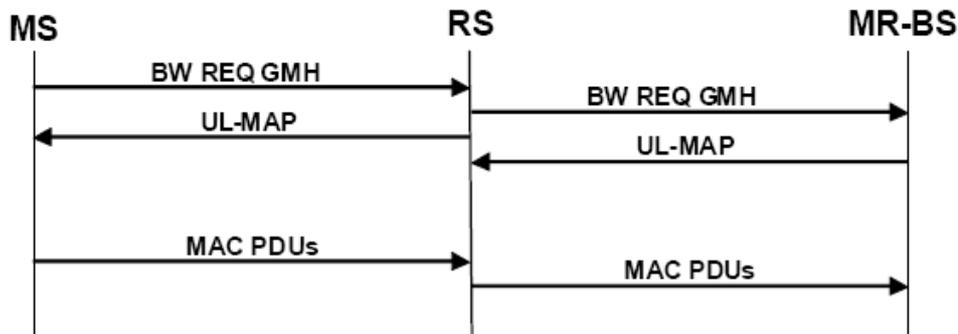


Figura 7.6: Planificación de solicitudes en modo distribuido.

### 7.2.2. Asignaciones

Las asignaciones de recursos vienen en forma de Elementos de Información (IEs) dentro de los mapas (DL-MAP, UL-MAP y R-MAP) que las estaciones superordinadas envían al principio de la trama<sup>21</sup>. Estos IE incluyen el CID básico de la estación subordinada que identifica a la conexión a la que se asignan dichos recursos; unos punteros que permiten delimitar el intervalo asignado dentro de la trama; y un índice de perfil de ráfaga que indica el perfil de ráfaga a utilizar en ese intervalo. Los mecanismos a través de los que toman las decisiones las estaciones planificadoras no están definidos en el estándar y cada fabricante puede diseñarlos de la manera que le parezca oportuna, siempre y cuando mantengan la compatibilidad con lo que se establece en el estándar.

Como se ha indicado, mientras las SS solicitan ancho de banda por conexión (especificando un CID concreto<sup>22</sup>), las asignaciones proporcionadas por la estación superordinada hacen referencia a la conexión básica establecida con la SS. Esto se debe a que como el proceso por el cual la estación superordinada decide qué solicitud es aceptada no es determinista, cuando una SS recibe una asignación menor que la que pidió, no sabe el motivo. En ese caso, la SS, basándose en la última información recibida de la estación superordinada, debe decidir si descarta el paquete o utiliza algún mecanismo para realizar una nueva solicitud de recursos.

#### 7.2.2.1. Asignaciones en redes multisalto operando con planificación distribuida

A parte de los mecanismos genéricos para la asignación de recursos, si la solicitud recibida por una RS operando con planificación distribuida proviene de una RS subordinada, la RS superordinada podrá utilizar el mensaje RS-SCH para comunicarle en cuántas tramas le serán asignados recursos y de qué tamaño serán. Basándose en esta información la RS subordinada puede asignar recursos a sus estaciones subordinadas con antelación. Este proceso se describe en la figura 7.7. Este mecanismo sólo es válido para el caso de estar utilizando el modo de retransmisión CID-based descrito en 7.5.2.2.

#### 7.2.2.2. Asignaciones en redes multisalto operando con planificación centralizada

Como se ha indicado previamente, en redes multisalto operando con planificación centralizada, todas las solicitudes de recursos de la red han de ser reenviadas a la MR-BS, que es quien asigna recursos para

<sup>21</sup>En el caso de las estaciones TTR, esta información se envía al comienzo de la zona de retransmisión del DL. Para más información se recomienda consultar la sección 7.4.

<sup>22</sup>Para permitir que el algoritmo de temporización del UL que utiliza la estación planificadora tenga en cuenta todas las implicaciones de la nueva petición y asigne el ancho de banda en consecuencia.

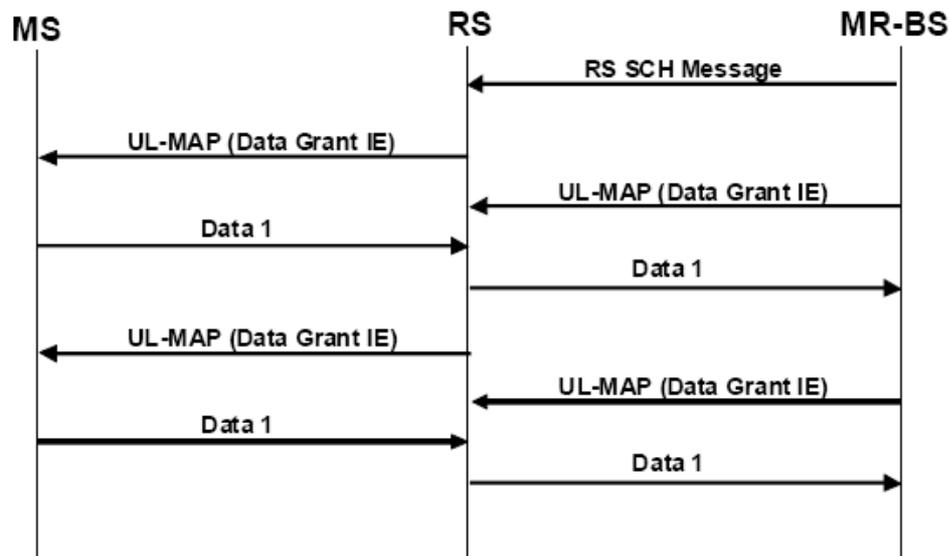


Figura 7.7: Planificación de asignaciones en modo distribuido.

cada estación. Una vez computadas todas las solicitudes, la MR-BS realiza las asignaciones para todas las estaciones no transparentes operando en modo centralizado de su celda. Las asignaciones más allá de su DL y UL las encripta en el mensaje RS\_Access-MAP para que las RS de acceso creen los mensajes MAP para su zona de acceso y en el mensaje RS\_Relay-MAP para que las RS intermedias creen los mensajes MAP para su zona de relay.

La información que va en cada uno de los intervalos que definen los mapas incluidos en el RS\_Access-Map son mayoritariamente datos que la MR-BS envía a las SS, o viceversa, por lo que para cada mensaje existe una referencia al intervalo en el que ha de ser enviado. En algunas ocasiones, la RS tiene que transmitir mensajes en su DL compuestos por ella misma. Como la MR-BS conoce cuando esto va a suceder introduce un RS\_BW\_Alloc IE en el RS\_Access-MAP, el cual apunta a uno de los intervalos definidos en el DL-MAP que retransmite la RS para que en él incluya la información de control que necesita transmitir.

En las asignaciones enviadas, además de los perfiles de ráfaga y el retardo en cada uno de los enlaces, la MR-BS ha de considerar el retardo mínimo de retransmisión de cada una de las estaciones intermedias.

### 7.3. Estructuración de la QoS en redes multisalto

Una de las características principales de la tecnología WiMAX es su capacidad para garantizar los recursos que las aplicaciones necesiten. Los recursos que las aplicaciones requieren varían con cada una, pudiendo referirse, por ejemplo, a un ancho de banda mínimo que necesitan para su operación correcta o a un retardo entre los paquetes recibidos no superior a un valor concreto. Garantizar estos parámetros permite que los servicios proporcionados por la red gocen de una mayor calidad, es decir, que funcionen como se espera. A esta capacidad de los sistemas se la denomina Calidad de Servicio (QoS) y al conjunto de valores que permiten a una aplicación funcionar con dicha QoS se les denomina parámetros de QoS o parámetros de tráfico.

En WiMAX la posibilidad de cumplir con los parámetros de tráfico de una aplicación se asienta sobre la base de asociar cada paquete que atraviesa la capa MAC a un flujo de servicio identificado con un

Identificador de Conexión de Transporte (Transport CID). Es importante resaltar que en WiMAX todo intercambio de información se lleva a cabo en el contexto de una conexión, ya sea ésta de gestión o de transporte, que permite a los agentes implicados en el proceso conocer los detalles de su manejo y actuar en consecuencia.

Para asignar los paquetes provenientes de capas superiores a cada una de las conexiones de transporte de una misma SS, éstos han de cumplir una serie de criterios definidos para cada conexión denominados clasificadores. Estos clasificadores proporcionan una gran flexibilidad ya que permiten mapear paquetes en función del puerto del que provengan, del protocolo de transporte que utilicen, del tipo de servicio al que pertenezcan (a través del campo DSCP del protocolo IP), etc.

Para proporcionar QoS a estas conexiones, se mapean las conexiones a nivel MAC a flujos de servicio (una conexión por flujo de servicio). Un flujo de servicio es un flujo unidireccional de paquetes que contiene los parámetros de tráfico de la aplicación a la que pertenece el paquete. En una red pueden existir tantos flujos de servicio como se desee tanto en el DL, como en el UL. En función de los parámetros de tráfico de cada flujo de servicio, sus paquetes serán tratados de una forma concreta para que todos alcancen la QoS requerida por la aplicación. Para poder estandarizar las operaciones de la SS y la MR-BS se han definido un número limitado de formas de manejo de los flujos de servicio denominados servicios de planificación.

Los servicios de planificación, por tanto, representan el mecanismo de manejo de datos utilizado por el planificador MAC para que el transporte de datos en una conexión se ajuste a las especificaciones de QoS de su flujo de servicio.

Una vez introducidos los distintos conceptos que se utilizarán en esta sección, a continuación se describirá en detalle cada uno de ellos.

### 7.3.1. Flujos de Servicio

Como se ha comentado previamente, los flujos de servicio están definidos por un conjunto de parámetros de QoS, como latencia, retardo o throughput, que caracterizan a las conexiones a la que están mapeados, y por un identificador de flujo de servicio (SFID) que los diferencia entre ellos.

La creación de un flujo de servicio se ha de llevar a cabo de una de las siguientes maneras: incluyendo explícitamente el conjunto de parámetros de QoS que lo caracterizan, refiriéndose indirectamente a un conjunto de parámetros de QoS especificando el nombre de una clase de servicio, o especificando la clase de servicio junto con las modificaciones a sus parámetros que la caracterizan.

Las clases de servicio son objetos opcionales que pueden estar implementados en la MR-BS, a los que se hace referencia por un nombre en ASCII<sup>23</sup>. Cada clase de servicio tiene predefinidos un conjunto de parámetros de QoS que pueden servir como macro para diferentes flujos de servicio, lo que facilita la gestión de la red, puesto que se pueden definir clases de servicio que sirvan para varios usuarios. Por ejemplo, el operador de la red puede crear la clase de servicio “Voz” en la que se incluirán los parámetros de QoS necesarios para que las comunicaciones de voz tengan la calidad adecuada. Por tanto, cuando se crea un flujo de servicio para definir el trato de las comunicaciones de voz (lo que será común a todos los usuarios), basta con hacer referencia a la clase de servicio “Voz” para que automáticamente se le asignen a ese flujo de servicio los requisitos de QoS de una comunicación de voz definidos por el operador de la red. Además, para dotar de mayor flexibilidad, el conjunto de parámetros de un flujo de servicio se puede aumentar hasta superar los parámetros de QoS establecidos en una clase de servicio, siempre y cuando lo autorice la MR-BS.

---

<sup>23</sup> Al ser opcionales, cada fabricante decide si incluirlos o no. En todo caso, el operador de cada red se tiene que encargar de la definición de su nombre y de sus características.

Existen dos formas de autorización para la activación de flujos de servicio: una estática y otra dinámica. La primera fue ideada para minimizar la intervención del usuario en el despliegue de los equipos WiMAX. Cuando un cliente se da de alta, le indica al proveedor de servicio las características de las conexiones (flujos de servicio) de los que quiere disponer, incluyendo el número, los parámetros de QoS, etc y firma un contrato de garantías de servicio. El proveedor de servicios entonces configura la bases de datos desde donde la SS se descargará las características de sus flujos de servicio, tal y como se describió en la sección 7.1.11. En esta modalidad no se permiten solicitudes de cambio para el conjunto de parámetros aprovisionados, ni para crear flujos de servicio de forma dinámica, ya que en el modo de autorización estática todos los servicios posibles están definidos de antemano.

Además, existe la posibilidad de que la MR-BS o la SS creen flujos de servicio dinámicamente. Ésta se lleva a cabo a través del módulo de autorización, que se da cuenta por adelantado de solicitudes de admisión y activación venideras y especifica la acción de autorización adecuada que se ha de tomar ante cada solicitud. Por lo tanto, en el modo dinámico, los flujos de servicio pueden ser creados, modificados o eliminados. Si bien es cierto que el estándar señala como obligatoria la posibilidad de que la MR-BS inicie estos procesos, la posibilidad de que lo haga una SS es opcional. A continuación se describe cada uno de ellos.

Es importante señalar, que la creación dinámica de flujos de servicio proporciona mucha mayor flexibilidad a las comunicaciones, pero el uso de la activación estática se adapta mejor a las características de los enlaces inalámbricos que plantea WiMAX. Esto es debido a que si por algún motivo “se cae” el enlace que une a ambas estaciones, los flujos creados dinámicamente desaparecen al reiniciarse y hay que volver a configurarlos, mientras que los creados estáticamente pueden ser accedidos por la SS sin la necesidad de que intervenga ningún humano en la reiniciación. Que un enlace inalámbrico de largas distancias “se caiga” (aunque sólo sea durante un segundo o menos) o que se desenchufe un equipo es bastante probable en comunicaciones rurales.

Con la introducción de múltiples saltos se ha definido el concepto de flujo de servicio de túnel. Éste es un flujo de datos que transporta los paquetes entre las RS de acceso y la MR-BS. Como las RS intermedias únicamente tienen que gestionar los requisitos de tráfico de los túneles y no de cada CID que van dentro del túnel de forma individual, este mecanismo facilita la gestión y reduce el número de mensajes que se envían.

Los túneles definidos en la enmienda 820.16j pueden ser de dos tipos: de gestión o de transporte. Como ya se indicó en la sección 7.1.9, ambos túneles pueden ser creados durante la inicialización de la RS en la red. Además, como ocurre para las SS, los túneles de transporte también pueden ser creados y modificados de forma dinámica. Estas modificaciones pueden dar lugar a los dos tipos de túneles de transporte que se definen en la enmienda: el túnel único o el túnel múltiple. Las RS conocen si ambos están permitidos en la red en el mensaje REG-RSP que la MR-BS les envía antes de inicializarse. A continuación se describe como se establece cada uno de ellos.

### 7.3.2. Establecimiento de conexiones de túneles

Como ya se indicó en el apartado 7.1.9, en el proceso de entrada de una RS en la red la MR-BS puede establecer un único túnel de datos con cada RS de acceso que puede tener parámetros de flujo de servicio asignados en su creación. Los túneles son establecidos para que las RS de acceso puedan incluir los paquetes de datos de CID con requisitos de tráfico similares dentro de la misma Relay MAC PDU. Si se sabe de antemano que los requisitos de tráfico de las SS que se van a conectar a ella van a permanecer constantes a lo largo de su operación en la red (por contratos o temas similares), se pueden incluir dichos requisitos en el mensaje DSA-REQ que la MR-BS envía a la RS de acceso para crear el túnel. Sin embargo, como en la mayoría de los casos no se saben las características de las conexiones de las SS (a no ser que sean SS que pasen de una RS a otra que se acaba de inicializar y le proporciona

mejores prestaciones) que se conectarán a ella, la MR-BS esperará al establecimiento de conexiones con éstas antes de asignar parámetros de servicio al túnel. En ese mensaje de creación de túnel, sea con parámetros o no, la MR-BS ha de asociar ese túnel a un camino para que las RS sepan cuál es el siguiente salto a la hora de encaminar paquetes que pertenezcan a ese túnel.

Sin embargo, la MR-BS para proporcionar más dinamismo a la red puede no proporcionar nunca parámetros de QoS a ese túnel, caso en el cual estaremos trabajando con el túnel único. Cuando se van a crear conexiones de datos entre la MR-BS y una SS que la MR-BS considere que deben atravesar un túnel que no tiene parámetros de servicio asociados, ésta debe, antes de hacerlo, enviar una solicitud (DSA-REQ) a todas las RS en el camino para obtener una decisión del protocolo de control de admisión de cada una de ellas que garantice que tienen recursos para soportar los requisitos de esta nueva conexión. Si la primera RS que lo recibe soporta la creación de la nueva conexión, reenvía ese mensaje a la siguiente RS en dirección a la de acceso (el camino a través del cual reenviar el mensaje viene indicado en el mensaje mismo, y puede ser implícito o explícito). Si el mensaje llega a la RS de acceso y ésta también lo soporta, envía un mensaje DSA-RSP a la MR-BS para que continúe el proceso de establecimiento de conexión, ya sea contestando con un DSA-RSP a la solicitud de una SS o enviando un DSA-REQ propio a la SS. En caso de éxito, la MR-BS tiene que enviar un DSA-ACK a las RS en el camino para confirmarles los requisitos de la conexión que se acaba de crear. Si cualquiera de las RS intermedias (incluida la de acceso) no soporta la creación de dicha conexión enviará un DSA-RSP a la MR-BS indicándole el motivo de su rechazo y si es posible, qué parámetros sí que soportaría.

Cuando un túnel ya tiene parámetros de flujo de servicio asociados, ya sea porque se preaprovisionaron al crear el túnel o porque ya tiene mapeada una conexión, la MR-BS puede decidir mapear nuevas conexiones al mismo, caso en el cual nos encontraremos ante un túnel múltiple. Para ello sigue un protocolo parecido al anterior pero esta vez utilizando mensajes DSC en vez de DSA, ya que los parámetros de flujo de servicio del túnel se ven modificados. Cuando la MR-BS realiza las solicitudes de admisión de nuevos flujos, los requisitos de QoS por los que pregunta, no son los de la conexión a añadir, si no por los que tendrá que soportar el túnel, es decir, el agregado de los requisitos de las conexiones que estarán mapeadas a ese túnel. En este mensaje la MR-BS puede también incluir el parámetro Per-RS QoS que indica a cada RS intermedia cuál es el retardo máximo con el que debe retransmitir los datos de esa conexión de túnel para mantener los requisitos de QoS de la misma<sup>24</sup>. Además, incluye el CID de la conexión a incluir para que la RS de acceso sepa los paquetes de qué conexiones mapear al túnel. Como en el caso anterior, si las RS intermedias lo soportan (incluido no superar ese retardo máximo definido por el Per-RS QoS), lo reenviarán hasta la RS de acceso, que, en caso de también soportarlo, enviará un DSA-RSP a la MR-BS para que continúe con el proceso.

En el caso de RS no transparentes operando con planificado distribuida y seguridad distribuida, como puede entender el contenido de los mensajes que se intercambian la MR-BS y las SS se reduce el número de mensajes a intercambiar para activar una conexión. Cuando se inicia la activación desde la SS, si la RS reenvía es una indicación implícita de que acepta la creación del flujo, además puede incluir ella misma su requisito de Per-RS QoS y en caso de rechazo los parámetros que aceptaría. Cuando se inicia la activación desde la MR-BS, si la RS no acepta la creación del flujo, le manda un DSA-RSP a la MR-BS y no retransmite la solicitud a la SS.

En el caso de que la planificación sea centralizada, la MR-BS no tiene que realizar consultas sobre la admisión de un nuevo flujo en la red puesto que conoce el estado de carga de los enlaces de todas las RS-NT centralizadas, puesto que las planifica ella misma. Sin embargo, si que debe notificar a las RS intermedias de la creación del túnel y de los requisitos de QoS de éste para que en el futuro puedan realizar solicitudes si lo necesitan para satisfacer sus requisitos de QoS y tenerlo en cuenta en su planificador para decidir qué paquetes enviar primero cuando reciba asignaciones más pequeñas de su estación

<sup>24</sup>Si este no se incluye, la RS utilizará el valor de retardo máximo de la conexión.

Syntax	Size (bit)	Notes
QoS Subheader() {	—	—
<b>Data delivery service</b>	3	0:UGS; 1: RT-VR; 2: NRT-VR; 3:BE; 4:ERT-VR; 5-7: <i>Reserved</i>
<b>Priority</b>	3	Priority is as defined in 11.13.5
<i>Reserved</i>	2	—
}	—	—

Figura 7.8: Estructura de la Subcabecera de QoS.

superordinada. A la RS de acceso, además, le tiene que indicar los CID que estén mapeados al túnel para que ésta se encargue de crear las Relay MAC PDUs con los paquetes de datos de dichas conexiones. El camino por el que retransmitir los mensajes pertenecientes al túnel también debe ser notificado para que luego puedan hacer peticiones en el UL. También hará lo propio cuando se produzca alguna modificación en los parámetros de QoS del túnel.

En ambos casos, al igual que los túneles pueden ser creados y modificados por adición, también pueden ser eliminados o modificados por reducción. Es decir, si la SS o a MR-BS deciden eliminar un flujo perteneciente a un túnel, no eliminarán el túnel entero si no que modificarán el túnel y sus parámetros. Si se trata de una conexión individual, o de un túnel con un único CID, sí que se podrá eliminar de forma completa mediante un mensaje DSD.

### 7.3.3. Servicios de planificación

El propósito principal de las características de cada flujo de servicio es definir el orden y la planificación de su transmisión en el interfaz con el medio radioeléctrico. Esta planificación se lleva a cabo de formas distintas en el canal de bajada y en el de subida. El canal de bajada (DL) lo gestiona directamente la MR-BS, quien define la duración de las ráfagas de datos asignadas a cada SS en base a los datos que recibe para cada una de ellas y a los niveles de prioridad. Además, define los perfiles de cada ráfaga en función a la calidad de señal recibida. Para la planificación del canal de subida (UL) la MR-BS utiliza un mecanismo conocido como Grant/Request para proporcionar a cada SS con los recursos requerido o con las oportunidades necesarias para poder solicitarlos cuando los necesite. Este mecanismo se escribe en profundidad en la sección 7.2.

En la práctica, WiMAX lleva esto a cabo a través de los servicios de planificación. Los servicios de planificación representan los mecanismos de manejo de paquetes soportados por el planificador MAC para el transporte del tráfico en una conexión de transporte. El MAC de WiMAX soporta cinco tipos distintos de servicios de planificación:

- Unsolicited Grant Service (UGS)
- Extended Real-Time Polling Service (ertPS)
- Real-Time Polling Service (rtPS)
- Non Real-Time Polling Service (nrtPS)
- Best Effort Services (BES)

Estos servicios de planificación se implementan usando garantías de recursos no solicitadas, sondeos, y procedimientos de acceso al medio en contienda. Estos mecanismos se definen en el estándar de tal forma que el fabricante pueda optimizar el rendimiento de cada uno de ellos, utilizando distintas combinaciones de estas técnicas de asignación de ancho de banda, siempre que mantenga a la vez compatibilidad con el estándar.

Para saber con qué servicio de planificación se van a tratar los paquetes de una conexión, será necesario comprobar los parámetros que se han definido para el flujo de servicio al que está mapeada. Estos son los parámetros de QoS que el estándar permite definir:

- **Prioridad de tráfico (Traffic Priority).** El parámetro sirve para diferenciar entre dos flujos que tengan el resto de parámetros iguales. A mayor prioridad menor debería ser el retardo y mayor la preferencia de estos paquetes en los búferes. Si el resto de parámetros no son iguales, la prioridad de tráfico no debe suponer un cambio en el orden de preferencia.
- **Tasa máxima de tráfico sostenida (Maximum Sustained Traffic Rate, bps).** Este parámetro define la tasa de información pico del servicio. Se mide en bps a la entrada de la subcapa de convergencia, por lo que no incluye cabeceras MAC o CRC. Este parámetro es sólo un límite, pero no una garantía de su obtención.
- **Ráfaga máxima de tráfico (Maximum Traffic Burst, bytes).** Este parámetro indica el tamaño máximo de ráfaga que debe ser acomodado por el servicio de planificación. Por regla general la velocidad física en los puertos de entrada y salida o en la interfaz radio puede ser mayor a la máxima tasa de tráfico sostenida. Por lo que este parámetro describe, la el tamaño máximo continuo que el sistema debería acomodar, asumiendo que el servicio no está usando ninguno de sus recursos disponibles.
- **Tasa mínima de tráfico reservada (Minimum Reserved Traffic Rate, bps).** Este parámetro especifica la mínima cantidad de datos media que debe ser transportada para el flujo de servicio. Si no se dice lo contrario, su valor por defecto es 0
- **Variación del retardo tolerada (Tolerated Jitter, ms).** Este parámetro define la máxima variación del retardo permitida para la conexión.
- **Retardo máximo (Maximum Latency, ms).** El valor de este parámetro especifica el máximo intervalo de tiempo entre la entrada de un paquete en la subcapa de convergencia (CS) y el envío del paquete por su interfaz radio.

Una vez conocidos los parámetros que condicionan el servicio de planificación a utilizar, a continuación se describe cada uno de ellos.

### 7.3.3.1. Unsolicited Grant Services (UGS)

UGS se ha diseñado para el transporte de flujos de servicios que generan periódicamente unidades fijas de datos (CBR), que permitan, por ejemplo, la emulación de T1 / E1 o VoIP sin supresión de silencios. La BS temporiza con regularidad las garantías negociadas al activar la conexión sin ninguna solicitud específica de la SS. Por ejemplo, una estación que requiera un ancho de banda continuo, no necesita solicitarlo, la estación planificadora se lo garantiza automáticamente. Esto elimina el overhead y la latencia que introducen las solicitudes de recursos para así poder cumplir con los requisitos especificados. Este tipo de garantías no solicitadas se realiza a través de asignaciones periódicas de recursos mediante IE en

el UL-MAP, que crean intervalos en el UL para la transmisión de datos con un perfil de ráfaga determinado. El tamaño de las garantías debe ser suficiente para mantener la tasa de los datos de longitud fija asociada al flujo de servicio tratado con este servicio, pero puede ser mayor.

Cualquier SS que esté utilizando una conexión tratada mediante el servicio UGS puede usar el bit de poll-me en la Subcabecera de Gestión de Asignaciones para informar a la BS de que la sondee ya que necesita ancho de banda para otra conexión. La estación planificadora puede ahorrar recursos interrogando a las SS que usan UGS sólo cuando éstas activen el bit de poll-me. A parte de este bit, la Subcabecera de Gestión de Asignaciones incluye un indicador de error (Slip Indicator), que permite a la SS informar que la cola transmisión lleva retraso debido a factores como la pérdida de garantías o la desincronización entre el sistema WiMAX y las redes externas. Una vez detectado ese indicador, la estación planificadora puede asignar ancho de banda adicional (en torno al 1 %) a la SS para que su cola de transmisión vuelva a un estado normal.

Los parámetros de QoS que un flujo de servicio ha de definir para ser tratado conforme a este servicio de planificación son:

- Maximum Sustained Traffic Rate
- Maximum Latency
- Tolerated Jitter
- Request / Transmission Policy
- Minimum Reserved Traffic Rate (si existe) = Maximum Sustained Traffic Rate

El parámetro de Request / Transmission Policy es el que indica qué opciones del mecanismo Grant / Request descrito en la sección 7.2 puede utilizar esta conexión. En este caso, las conexiones planificadas con UGS no pueden utilizar los intervalos para solicitar recursos.

### 7.3.3.2. Real time Polling Services (rtPS)

El rtPS ha sido diseñado para cumplir con la necesidades de servicios que son dinámicos en su naturaleza, datos en tiempo real con paquetes de longitud variable y transmitidos de forma periódica, como MPEG. Para cumplir con sus requisitos, la estación planificadora ofrece oportunidades de solicitud dedicadas de forma periódica mediante sondeos individuales que permiten a las SS indicar las necesidades de sus conexiones para cumplir con los requisitos de los flujos de servicio mapeados a ella. El uso de sondeos simplifica el acceso y garantiza que las aplicaciones reciban oportunidades de forma determinista.

Dado que las SS utilizan solicitudes explícitas, el overhead y la latencia se incrementa con respecto a UGS, sin embargo, esto permite utilizar garantías de tamaño variable para optimizar la eficiencia del transporte de datos.

Los parámetros de QoS que un flujo de servicio ha de definir para ser tratado conforme a este servicio de planificación son:

- Minimum Reserved Traffic Rate
- Maximum Sustained Traffic Rate
- Maximum Latency
- Request / Transmission Policy

Como este servicio de planificación se basa en proporcionar oportunidades de solicitudes dedicadas de forma periódica, la Request / Transmission Policy debe ser tal que la SS tenga prohibido usar ninguna oportunidad de solicitud en contienda. Además, para mantener este método de planificación, la estación planificadora puede proporcionar oportunidades de solicitud dedicadas incluso si las anteriores oportunidades proporcionadas no han sido utilizadas. Esto implica que las SS sólo podrán utilizar estas oportunidades de petición para obtener intervalos de transmisión. Además, si el tráfico lo permite, la estación planificadora puede asignar a estas conexiones recursos para transmitir en vez de sondearlas individualmente.

Este tipo de servicios se ajusta muy bien para conexiones que transporten servicios como VoIP con supresión de silencios o audio y vídeo en streaming.

### 7.3.3.3. Extended real time Polling Service (ertPS)

El servicio de planificación Extended rtPS ha sido creado con la intención de aprovechar las ventajas que ofrecen los servicios UGS y rtPS. De esta forma, la MR-BS tiene que proporcionar asignaciones individuales como hace con las conexiones que trata mediante UGS, ahorrándose, de esta manera, los recursos consumidos por las peticiones. Sin embargo, mientras que en el caso de UGS estas asignaciones eran fijas, en ertPS son dinámicas. Para ello, las SS pueden utilizar las asignaciones que le proporciona la MR-BS para enviar datos o para solicitar recursos. Por defecto, el tamaño de las asignaciones debe corresponderse con el valor admitido del Maximum Sustained Traffic Rate de la conexión. La SS puede solicitar el cambio del tamaño de estas asignaciones bien usando el campo Extended Piggyback Request de la Subcabecera de Gestión de Asignaciones, descrita en 7.2.1.2, o mediante el campo BR de las cabeceras de señalización MAC. Si la SS reduce el tamaño de las asignaciones a 0, la MR-BS puede optar por sondearla individualmente o no sondearla y que la SS tenga que obtener recursos mediante contienda. En cuanto la SS cambie el tamaño de sus asignaciones, la BS le tendrá que, de nuevo, proporcionar asignaciones en consecuencia.

Los parámetros que un flujo tiene que fijas para ser tratado mediante este servicio de planificación son:

- Maximum Sustained Traffic Rate.
- Minimum Reserved Traffic Rate.
- Maximum Latency.
- Request / Transmission Policy.

El servicio de planificación Extended rtPS fue diseñado para soportar servicios de tiempo real que generan paquetes de tamaño variable de forma periódica tales como los servicios de Voz sobre IP con supresión de silencios.

### 7.3.3.4. Non real time Polling Services (nrtPS)

Este servicio fue diseñado para flujos de servicio que no son de tiempo real que generan ráfagas de paquetes de datos de tamaño variable. Para ello nrtPS ofrece sondeos periódicos a sus conexiones de forma regular, lo que asegura la posibilidad de realizar peticiones de recursos incluso cuando el enlace está saturado. Típicamente la estación planificadora sondea las conexiones que se planifican mediante este servicio con un intervalo de 1s.

Lo habitual es que los servicios transportados en estas conexiones toleren mayor retardo y sean prácticamente insensibles a la variación del mismo. Este servicio se ajusta muy bien para el acceso a Internet que requiera ciertos mínimos, como FTP.

Los parámetros de QoS que un flujo de servicio ha de definir para ser tratado conforme a este servicio de planificación son:

- Minimum Reserved Traffic Rate
- Maximum Sustained Traffic Rate
- Traffic Priority
- Request / Transmission Policy

Para que este servicio funcione correctamente la Request / Transmission Policy debe ser tal que la SS pueda usar oportunidades de solicitud dedicadas y oportunidades de solicitud en contienda. Además, si el tráfico lo permite, la estación planificadora puede asignar a estas conexiones recursos para transmitir en vez de sondearlas individualmente.

#### 7.3.3.5. Best Effort Services (BES)

Este servicio fue diseñado para la navegación por Internet, es decir, para flujos de datos que no requieren un nivel de servicio mínimo y que pueden ser transmitidos sólo cuando existen recursos disponibles. Las SS envían solicitudes ya sea mediante ranuras de acceso aleatorio o en oportunidades de transmisión dedicadas, pero no deberían confiar en la presencia de estas últimas, ya que dependen de la carga de la red.

Los parámetros de QoS que un flujo de servicio ha de definir para ser tratado conforme a este servicio de planificación son:

- Maximum Sustained Traffic Rate
- Traffic Priority
- Request / Transmission Policy

La Request / Transmission Policy de este servicio es muy similar al de nrtPS, pero se diferenciará de ésta en la longitud de los intervalos entre sondeos.

#### 7.3.4. Mecanismos para la provisión de QoS en redes multisalto

En redes multisalto además del esquema de conexiones individuales, también se define el esquema de conexiones túnel. Para ambos casos, se aplican los mecanismos de Grant / Request definidos en la sección 7.2, pero con alguna salvedad que se describe a continuación.

##### 7.3.4.1. Provisión de QoS con conexiones individuales

Una vez que los flujos son admitidos en la red, sus parámetros tienen que ser garantizados. En función de estos parámetros, las conexiones son tratadas de una u otra forma, ya sea recibiendo asignaciones fijas no solicitadas, siendo sondeadas periódicamente sobre sus necesidades de ancho de banda, etc. El tratamiento concreto viene definido por los servicios de planificación descritos en 7.3.3.

Cuando se trabaja en la modalidad de planificación centralizada es la MR-BS la que toma todas las decisiones y realiza las asignaciones pertinentes a todas las RS del camino, tal y como se definió en 7.2.2.2, para que los flujos de servicio de las SS reciban los recursos suficientes para cumplir con sus requisitos de QoS. Es decir, las RS con planificación centralizada no se tienen que complicar realizando solicitudes

para cada conexión, únicamente reenviar los paquetes que reciba. Para mapear las asignaciones a los paquetes a retransmitir el estándar define el protocolo de retransmisión descrito en 7.5.2.2.

Cuando se trabaja en modalidad de planificación distribuida, todos los nuevos flujos que se creen tienen que ser autorizados por el módulo de control de admisión de cada RS en el camino. Por lo que, una vez aceptados, cada RS ha de ser capaz de garantizar en su celda los requisitos de cada flujo admitido. Sin embargo, una cosa es que cada RS mantenga la QoS de una conexión en su celda y otra es hacerlo de extremo a extremo. Para solucionarlo, cuando la MR-BS consulta a las RS sobre su decisión en cuanto a la admisión de control, le puede indicar mediante el campo Per RS QoS, el retardo máximo que puede introducir para mantener la QoS extremo a extremo de una conexión. Si se los envía, la RS deberá utilizar éste parámetro en vez del retardo máximo de la conexión de la SS. Cuando la SS solicita la creación de la conexión en modo de seguridad distribuido es la RS la que le indica a la MR-BS cuál es la latencia máxima que va a introducir por retransmitir los paquetes de ese flujo de servicio, para que la MR-BS lo tenga en cuenta a la hora de decidir si admite ese nuevo flujo.

Para mantener los requisitos de QoS de estas conexiones, las RS operando en planificación distribuida son las que gestionan el UL de las SS. Sin embargo, para retransmitir esos datos es el planificador de la estación superordinada el encargado de garantizar los recursos a las SS de forma que puedan seguir cumpliendo con los requisitos establecidos para esa conexión.

#### 7.3.4.2. Provisión de QoS con conexiones de túnel

Como ya se ha indicado, la MR-BS puede crear túneles de transporte entre ella y una RS de acceso. Salvo cuando se trata de un único túnel de transporte sin parámetros asociados, el resto de túneles tienen asociados unos parámetros de flujo de servicio que especifican los requisitos de QoS de ese túnel.

En el caso de operar en modo centralizado, únicamente cuando se crea un túnel en el UL hay que realizar alguna notificación: indicar a la RS de acceso los CIDs asignados a ese túnel para que los mapee correctamente. Por lo demás, la MR-BS controla todo lo que ocurre en su celda y planifica las asignaciones de forma que se cumplan los requisitos de QoS para ese túnel. El estándar define el mecanismo para que las RS mapeen los paquetes a las asignaciones que tienen que utilizar para retransmitirlo. Dicho mecanismo se describe en la sección 7.5.2.1. Por lo que en este modo, salvo excepciones, las RS no tienen que preocuparse por cumplir con los requisitos de QoS del túnel puesto que es la MR-BS la que se encarga de que se cumplan todos los requisitos.

En el caso de operar en modo de planificación distribuida, las RS son consultadas sobre la admisión de cualquier cambio que ocurra dentro de un túnel. En caso de ser admitidos, el funcionamiento es similar al descrito para las conexiones individuales, puesto que con cada cambio, la MR-BS les ha de comunicar cuáles serían los parámetros de servicio para cada túnel. En caso de ser aceptados los cambios, se utilizarían esos nuevos parámetros de servicio para el túnel. Al igual que en el caso de las conexiones individuales, la MR-BS puede indicar a las RS cuál sería el parámetro Per RS a utilizar para garantizar esos parámetros extremo a extremo. Por lo que, los parámetros de QoS de un túnel lo conformarán el agregado de los requisitos de las conexiones que transporta, más el retardo máximo que cada RS puede introducir para garantizarlos extremo a extremo. En la Figura 7.9 se muestra un ejemplo que proporciona el estándar sobre cómo agregar en cada parámetro.

Por último, en modo de planificación distribuida existe la posibilidad de trabajar con un único túnel de transporte sin parámetros de servicio asociados. Este caso serviría para que la RS de acceso o la MR-BS tuvieran la libertad de mapear paquetes de CIDs con características similares dentro de una Relay MAC PDU sin la necesidad de crear múltiples túneles para cada grupo de CIDs similares. A esta Relay MAC PDU la estación de ingreso le tiene que añadir una QoS Subheader en la que se indique qué tipo de tráfico contiene y qué prioridad hay que asignarle. En el UL, las RS utilizan la Cabecera Tunnel BR, descrita en la sección 7.2.1.3, para solicitar los recursos necesarios para poder retransmitir esta Relay MAC PDU.

Name	Aggregated value
Traffic Priority	The highest priority among all the service flows' traffic priority admitted into a tunnel
Maximum Sustained Traffic Rate	Sum of all the service flows' maximum sustained traffic rate admitted into a tunnel
Maximum Traffic Burst	Min { Sum of all the service flows' maximum traffic burst admitted into a tunnel, Maximum allowed size of traffic burst }
Minimum Reserved Traffic Rate	Sum of all the service flows' minimum reserved traffic rate admitted into a tunnel
Maximum Latency	Minimum value among all the service flows' maximum latency values admitted into a tunnel
Tolerated Jitter	Minimum value among all the service flows' tolerated jitter values admitted into a tunnel
Unsolicited Grant Interval	Highest common divisor of all the service flows' unsolicited grant interval values admitted into a tunnel

Figura 7.9: Ejemplo de agregación de parámetros de QoS en un túnel.

Los campos de tipo de servicio y prioridad de la Subcabecera de QoS y la Cabecera Tunnel BR tienen que coincidir.

## 7.4. Soporte a la capa física dentro de la capa MAC

Hasta la aparición del modo de retransmisión multisalto, la operación de WiMAX se basaba en la separación entre el Downlink (DL), donde la BS enviaba información de control para coordinar las transmisiones de las SS, además de tramas de datos dirigidas a ellas; y el uplink (UL) donde las SS enviaban sus datos a la BS conforme a la planificación que habían recibido.

Con la introducción de los retransmisores, esta división se complica un poco puesto que además de dividir la trama entre DL y UL, se divide en zona de acceso y zona de retransmisión.

La zona de acceso es en la que intervienen las estaciones finales: la zona de acceso del DL es aquella en la que las SS reciben su información de control y sus datos, mientras que la zona de acceso del UL es donde envían sus datos. Dependiendo del tipo de retransmisor y de la configuración de la red, las comunicaciones de cada SS las recibirá la MR-BS o la estación retransmisora, pudiéndose dar el caso de que algunas se comuniquen directamente con la BS y otras a través de estaciones retransmisoras.

La zona de retransmisión es la que utilizan las estaciones retransmisoras para recibir información dirigida a las estaciones finales o para retransmitir información proveniente de éstas. De esta forma, en la zona de retransmisión del DL las RS recibirán de su estación superordinada información dirigida a las estaciones finales; y en la zona de retransmisión del UL las RS retransmitirán información que han recibido de sus estaciones subordinadas. Se utilizan aquí los conceptos de estación superordinada y estación subordinada, puesto que el sistema WiMAX puede constar de varios saltos. Se denomina estación superordinada para referirse a la estación intermedia siguiente en dirección a la MR-BS; y estación subordinada a la estación intermedia siguiente en dirección a la SS.

Es decir, que ahora, mientras la MR-BS sigue transmitiendo en el DL y recibiendo en el UL y la SS sigue recibiendo en el DL y transmitiendo en el UL, las RS transmiten y reciben en ambas partes de la trama. Transmiten en dirección a la SS en la zona de acceso del DL, reciben de su estación superordinada (o MR-BS) en la zona de retransmisión del DL, reciben de su estación subordinada (o SS) en la zona de acceso del UL, y transmiten en dirección a la MR-BS en la zona de retransmisión del UL.

Para la coordinación de las transmisiones se siguen utilizando elementos de información (IE), tal y como se hacía en el modo PtMP. Para la zona de acceso, las SS continúan recibiendo sus tramas conforme a los IEs que le correspondan en el DL-MAP y transmitiendo conforme a lo indicado en los IE del UL-MAP. De esta forma, las SS existentes en el mercado no necesitan ningún cambio para operar en el modo de retransmisión multisalto. La diferencia conceptual es que ahora estos mapas los puede recibir de la MR-BS o de una RS no transparente.

Los IE que definen el uso de las zonas de retransmisión se envían dentro del R-MAP. Dentro de este mapa se incluyen tanto los IE que definen la zona de retransmisión del DL, como los del UL. Dependiendo de la modalidad de planificación que se utilice en el sistema, este Mapa lo creará la MR-BS (centralizado), que como ya se indicó, se lo hará llegar a las estaciones dentro del RS\_Access-Map, o las RS no transparentes (distribuido).

Esto plantea problemas de sincronismo, puesto que la MR-BS (o RS no transparentes con todas las capacidades), para mantener compatibilidad con el modo PtMP, indica al resto de estaciones cuál es la estructura de la trama y cuál es la planificación a través de los mapas que envía al comienzo de la zona de acceso del DL. Es decir, en el momento en que las RS no transparentes hacen lo propio con sus estaciones subordinadas. ¿Cómo pueden saber, por tanto, dichas estaciones cuál es la estructura de la trama y cuándo tienen que transmitir y recibir dentro de ella?. Ante este hecho, el estándar plantea dos soluciones, una a nivel físico y otra a nivel MAC.

A nivel físico, el estándar considera la posibilidad de estaciones no transparentes capaces de transmitir y recibir de forma simultánea en dos canales distintos. A este tipo de estaciones las llama STR (Simultaneous Transmit and Receive). Por lo que una STR puede estar al mismo tiempo recibiendo información de configuración de la MR-BS en un canal y transmitiendo hacia sus subordinadas en otro. En esta modalidad la estación STR recibe el R-MAP en la zona de acceso del DL, justo después del resto de los mapas. Este es también el modo de sincronización que utilizan las RS Transparentes

Para aquellas estaciones que no pueden transmitir y recibir de forma simultánea, denominadas TTR (Time-division Transmit and Receive), es para la que se plantea la solución de sincronismo en la capa MAC. Estas estaciones reciben la estructura de la trama al recibir los parámetros de operación durante el proceso de inicialización en la red (consultar sección 7.1.10). Estos parámetros son enviados dentro del mensaje RS\_Config-CMD, que en los campos DL Subframe Configuration y UL Subframe Configuration incluye la estructura de la trama. Si por motivos operacionales la MR-BS se ve obligada a modificar la estructura de la trama, se lo comunica a las TTR con un nuevo mensaje RS\_Config-CMD, que en el campo Frame Number Action indica el número de la trama en que la nueva configuración se vuelve activa. En este caso, el R-MAP que contiene su planificación se envía al comienzo de la zona de retransmisión del DL.

En un mismo sistema WiMAX pueden coexistir estaciones STR y estaciones TTR, siempre y cuando compartan el mecanismo de sincronía. En este caso, cuando las estaciones STR se inicializan, la MR-BS les indica dentro del mensaje RS\_Config-CMD qué método tienen que utilizar para mantenerse sincronizadas. Esto lo realiza a través del campo Frame Configuration Mode.

Una vez descrita la nueva configuración de la trama y como reciben su estructura las distintas estaciones, se presentan, a modo de resumen, los tres tipos de estaciones retransmisoras que el estándar define a nivel físico:

- **Transparentes:** Estas RS no transmiten información de control y se limitan a recibir los datos de las SS y reenviárselos a la MR-BS, y viceversa. Estas estaciones reciben de la MR-BS la estructura de la trama junto con su planificación en la zona de acceso del DL.
- **No transparente TTR:** Estas RS transmiten información de control a sus subordinadas. Al no poder transmitir y recibir de forma simultánea, no pueden recibir la estructura de la trama a través de los

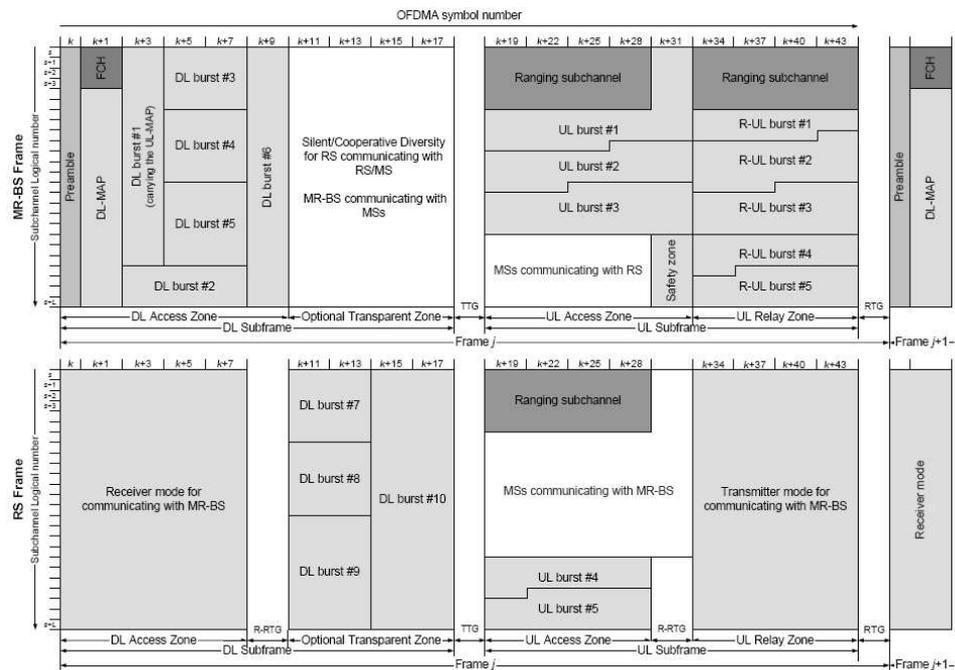


Figura 7.10: Estructura de la trama para el modo transparente.

mapas que transmite la MR-BS al inicio de la trama. Para solucionarlo, recibe la estructura de la trama en el momento de su inicialización y su planificación en el R-MAP que se envía al principio de la zona de retransmisión del DL.

- No transparente STR. Estas RS transmiten información de control a sus subordinadas. Al poder transmitir y recibir simultáneamente, pueden recibir la información de control de la trama de forma habitual. Además, si las estaciones STR quieren coexistir en un sistema donde existan estaciones TTR son configuradas para recibir la información de control de la misma forma que éstas.

A continuación se muestran las posibles tramas para cada una de las estaciones descritas.

#### 7.4.1. Estructura de la trama para el modo transparente

En la Figura 7.10 se muestra un ejemplo de la estructura de las tramas para el modo transparente. Como se puede observar, la figura contiene dos tramas: la superior muestra la trama según la perspectiva de la MR-BS y la inferior según la RS transparente.

Como se muestra en la figura, la trama presenta una zona de retransmisión en el DL. Esta zona se puede utilizar de dos formas. La más común consiste en que la RS la utilice para retransmitir las tramas que recibe de su estación superordinada, es decir, para comunicarse con las SS. En esta modalidad la MR-BS permanecería inactiva durante la zona de retransmisión del DL. La segunda opción contempla un modo de funcionamiento mucho más avanzado, denominado diversidad cooperativa. En él, tanto la MR-BS como las RS transmitirían simultáneamente la misma información en la zona transparente para mejorar las prestaciones de la red.

La zona de acceso del DL se utiliza de la forma habitual, y en ella la MR-BS transmite la estructura de la trama, la información de planificación para las zonas de acceso (DL-MAP y UL-MAP) y de retransmisión (R-MAP), y los datos para las SS que se comunican directamente con ella.

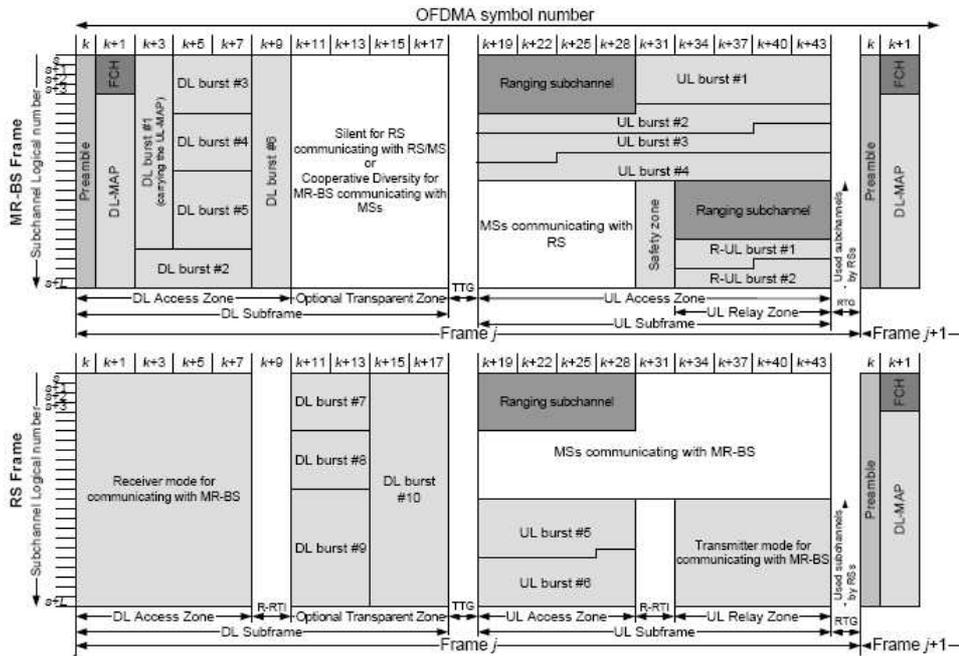


Figura 7.11: Estructura de la trama para el modo transparente con subcanalización en el UL.

La subtrama del uplink puede contener tanto una zona de acceso, como una de retransmisión. Dependiendo de la configuración de la red, en la zona de acceso, donde tanto la MR-BS como la RS transparente están en modo de recepción, las SS se comunican bien directamente con la MR-BS o bien con la RS transparente. Para aumentar la eficiencia de los dispositivos y aprovechando que tanto la MR-BS como la RS conocen la planificación, dichas estaciones sólo escuchan el canal cuando saben que las transmisiones van dirigidas a ellas. Esto se refleja en la trama en las zonas blancas del UL donde se supone que la RS está en reposo. Al final de la zona de acceso de la trama de la MR-BS, existe un intervalo denominado Safety Zone en el que nadie transmite. Este intervalo se utiliza para que la RS transparente pueda conmutar entre recepción y transmisión.

La zona de retransmisión del UL se utiliza para que la RS transparente retransmita los datos recibidos. Puede ocurrir que no haya tanto tráfico de retransmisión, en cuyo caso la MR-BS puede optar por subcanalizar la zona de retransmisión en el UL para dotar de más recursos a la zona de acceso. Un ejemplo de esta trama se muestra en la Figura 7.11.

En la subtrama del UL aparecen, además, dos zonas de Ranging (Alineamiento). La de la zona de acceso es usada por las RS para llevar a cabo el Alineamiento Inicial (consultar Sección 7.1.3 y por las SS para todo tipo de Alineamientos (Alineamiento Inicial, Solicitudes CDMA, etc)). En la zona de retransmisión, este intervalo lo usan las RS para el resto de tareas de Alineamiento, excepto para el Alineamiento Inicial, fundamentalmente para solicitar ancho de banda.

El estándar contempla, además, una zona de Retransmisión Directa. Esta zona sólo puede ser asignada a RS transparentes que trabajen en modo end-to-end HARQ y no puede ser utilizada para más de dos saltos. En esta zona la RS demodula y desenlaza (des-interleaving), no decodifica, los datos recibidos y los retransmite remodulados y re entrelazados en la misma trama. El establecimiento de esta zona se realiza a petición de la RS durante la etapa de Negociado Básico de capacidades (consultar Sección 7.1.4) y su estructura se define en el campo Direct Zone Configuration del mensaje RS\_Config-CMD.

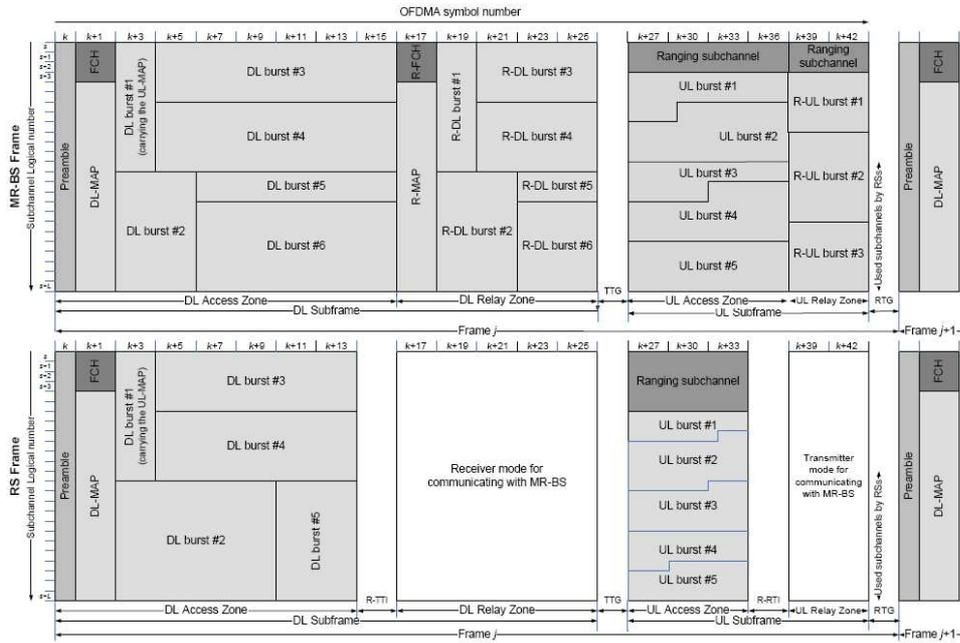


Figura 7.12: Estructura de la trama para el modo no transparente TTR.

### 7.4.2. Estructura de la trama para el modo no transparente TTR

En la Figura 7.12 se muestra un ejemplo de trama del modo no transparente TTR. Al igual que en el modo transparente, la figura muestra la trama desde la perspectiva de la MR-BS y desde la perspectiva de la RS. En este modo las zonas están claramente diferenciadas:

- En la zona de acceso del DL ambas estaciones planifican las transmisiones y recepciones de sus estaciones subordinadas (con el DL-MAP y el UL-MAP), y les envían sus datos.
- En la zona de retransmisión del DL la MR-BS planifica el enlace de retransmisión entre ella y sus RS subordinadas (con el R-MAP), y les envía sus datos. La RS, por tanto, se dedica a escuchar en este intervalo para poder recibir la información que le envía la estación superordinada.
- En la zona de acceso del UL, ambas estaciones reciben las transmisiones de sus estaciones subordinadas.
- En la zona de retransmisión del UL, las RS retransmiten la información de sus subordinadas a su estación superordinada.

Las estaciones no transparentes TTR se caracterizan porque no pueden transmitir y recibir al mismo tiempo. Sabiendo esto, el estándar define que la operación bajo este modo puede realizarse de dos formas distintas:

- En la primera opción, se permite a las RS y a la MR-BS agrupar varias tramas, como la mostrada en la Figura 7.12, en una multitrama que contenga un patrón en las asignaciones de las zonas de retransmisión. De esta forma, se puede indicar a cada una de las estaciones que transmita, reciba, o permanezca en reposo en cada una de las zonas de retransmisión. Por ejemplo, una multitrama de dos tramas puede consistir en asignar a las RS de los saltos impares la zona de retransmisión en el DL de las tramas impares, y a la MR-BS y a las RS de los saltos pares la zona de retransmisión

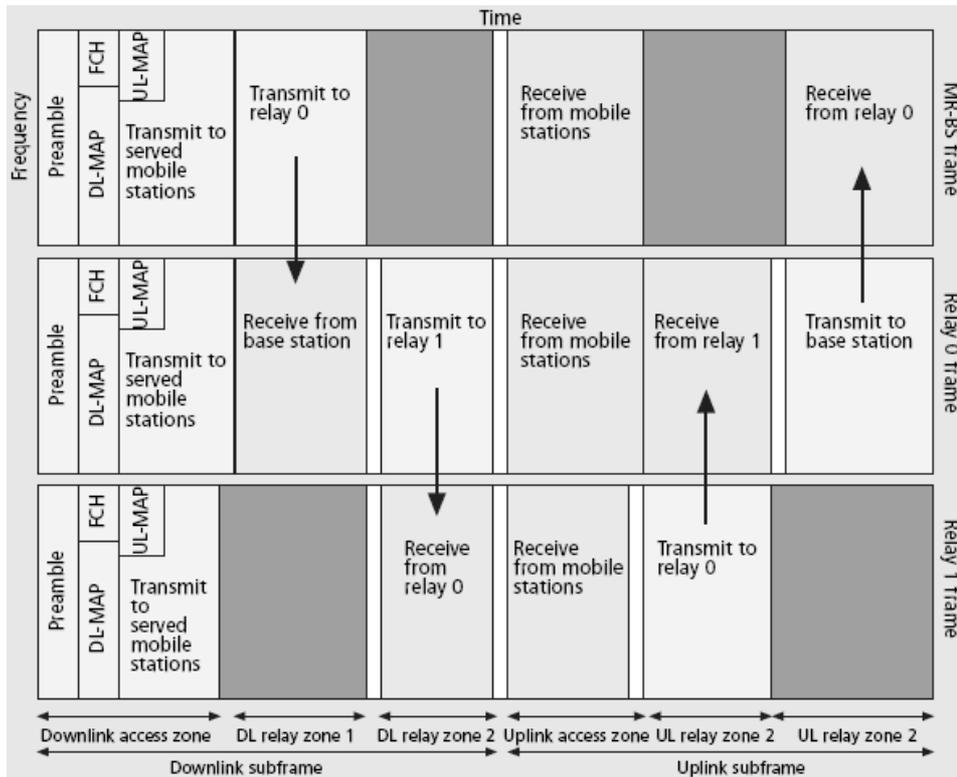


Figura 7.13: Estructura de la trama para el modo no transparente TTR con el DL subdividido.

en el DL de las tramas pares. La configuración de la estructura de las multitramas se realiza en el mensaje RS\_Config-CMD.

- En la segunda opción, las zonas de retransmisión de cada trama se dividirían en subzonas de retransmisión. Las RS y la MR-BS son asignadas para transmisión, recepción, o reposo en cada subzona. De esta forma, por ejemplo, las RS de los saltos impares podrían ser asignadas para transmitir en una subzona de retransmisión del DL, y la MR-BS y las RS de los saltos pares en otra. Un ejemplo de la trama se muestra en la Figura 7.13. La configuración de esta la estructura de transmisión también se realiza en el RS\_Config-CMD.

Cabe destacar que una estación TTR puede utilizar una frecuencia distinta para la comunicación con sus subordinadas que la que utiliza para la comunicación con su superordinada. Esta opción se realiza durante el negociado de capacidades básicas con la estación superordinada activando el bit “support of a second carrier frequency at RS”. Si este bit se activa, se pueden incluir los detalles del segundo canal que utilizará. Es importante resaltar que estos detalles están claramente especificados para la bandas de 2,3 y 3,5 GHz.

El uso de los canales de Alineamiento son los mismos que los descritos en la sección 7.4.1. Además, al igual que en el modo transparente, el estándar ofrece la posibilidad de subcanalizar la zona de retransmisión del UL. Un ejemplo de este tipo de trama se muestra en la Figura 7.14.

### 7.4.3. Estructura de la trama para el modo no transparente STR

Las estaciones no transparentes STR se caracterizan por poder transmitir y recibir de forma simultánea. El estándar propone dos escenarios para la utilización de estas estaciones: uno en el que permite la

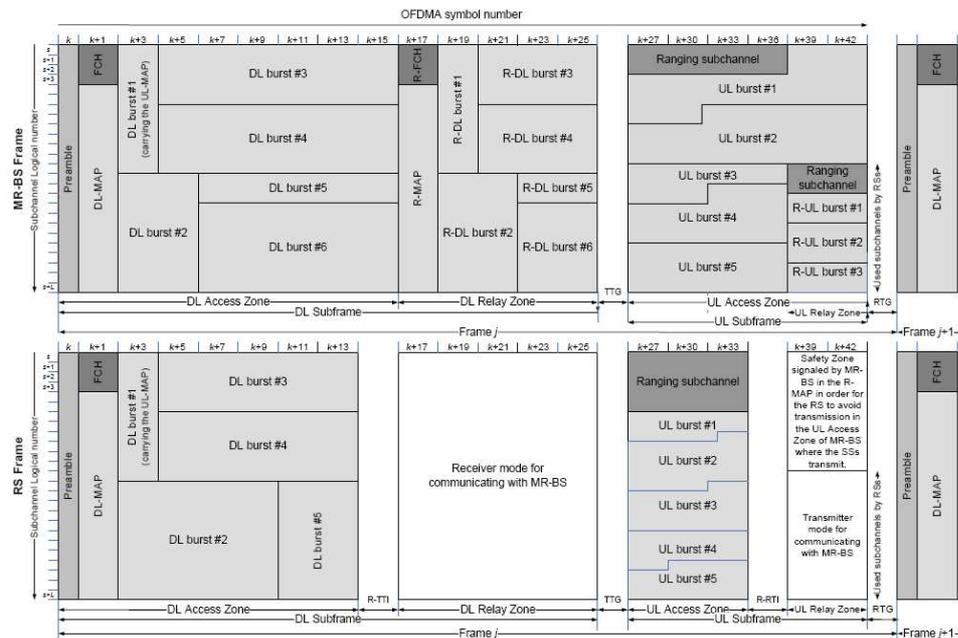


Figura 7.14: Estructura de la trama para el modo no transparente TTR con el UL subcanalizado.

coexistencia con estaciones TTR y otro en el que no.

En el primero, la estructura de la trama es la que se presenta en la Figura 7.15. Como se puede observar, la estructura de la trama es la misma que la mostrada en la Figura 7.12, lo que permite coexistencia con estaciones TTR. La estructura de trama de la STR permite una red de más de dos saltos, puesto que incluye zonas de retransmisión en el DL y el UL en la segunda portadora, sin tener que recurrir a mecanismos adicionales como las multitramas o las estructuras de transmisión.

En el segundo escenario, la estructura de la trama que utilizan la MR-BS y las estaciones STR es la que se muestra en la Figura 7.16. Las STR utilizan esta trama en su segunda portadora para la comunicación con sus subordinadas. Mientras que en la primera portadora se comporta como una SS, recibiendo en el DL y transmitiendo en el UL, de una forma similar a la mostrada en la primera portadora de la Figura 7.15. Es importante mencionar que aunque la estructura mostrada en la Figura 7.16 es similar para ambas estaciones, no es así para su contenido, puesto que cada una rellenará sus mapas como estime oportuno.

#### 7.4.4. Consideraciones en la estructura de las tramas

En las tramas mostradas hasta el momento se ha podido apreciar la existencia de unos intervalos vacíos que permiten a las estaciones cambiar su estado entre transmisión y recepción y viceversa. Así tenemos:

- TTR. Es el tiempo que hay que dejar a una estación final para que conmute entre recepción y transmisión. A su vez es el tiempo para que la MR-BS conmute entre transmisión y recepción. Este intervalo se localiza entre el DL y el UL.
- RTG. Es el tiempo que hay que dejar a una estación final para que conmute entre transmisión y recepción. A su vez es el tiempo para que la MR-BS conmute entre recepción y transmisión. Este intervalo se localiza entre el UL y el DL.

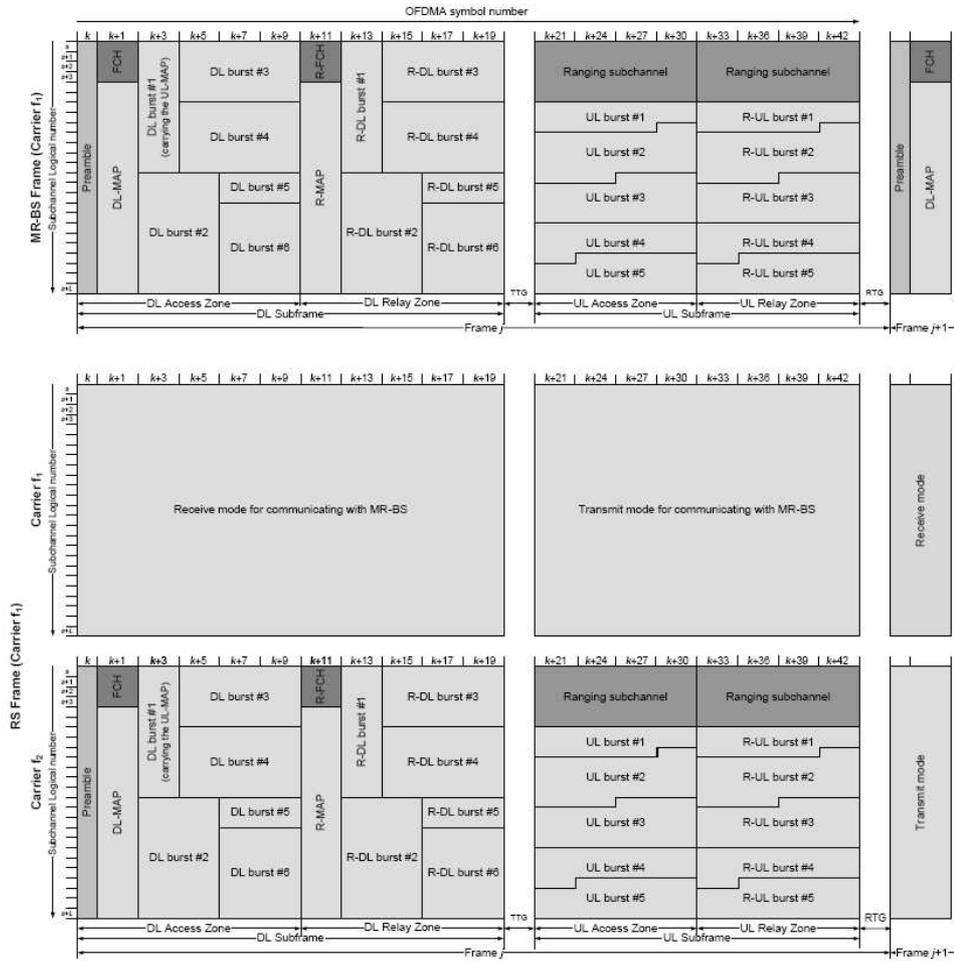


Figura 7.15: Estructura de la trama del modo no transparente STR compatible con el modo TTR.

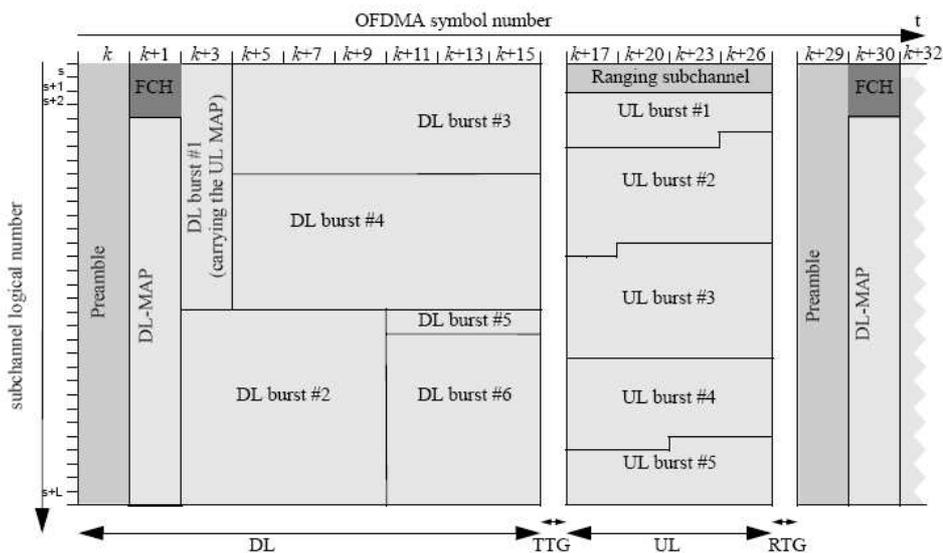


Figura 7.16: Estructura de la trama del modo no transparente STR no compatible con el modo TTR.

- RSTTG. Es el tiempo que una RS necesita para conmutar entre transmisión y recepción. Este intervalo se localiza entre las zonas de acceso y retransmisión del DL
- RSTRTG. Es el tiempo que una RS necesita para conmutar entre recepción y transmisión. Este intervalo se localiza entre las zonas de acceso y retransmisión del UL.

#### 7.4.5. Estructura de los mensajes que componen las subtramas de control

En una trama se denomina subtrama de control al intervalo existente dentro de la trama de downlink, normalmente al inicio, que define la operación de las distintas estaciones en la red. Esta subtrama está compuesta por:

- FCH: Indica la longitud de la siguiente ráfaga en el Downlink (DL) de la zona de acceso, en la que se describe la trama, por lo que el FCH ayuda a las estaciones a interpretar la primera ráfaga de la zona de acceso del DL. Tiene un símbolo de duración.
- DCD (Downlink Channel Descriptor): Como su propio nombre indica, se encarga de describir físicamente el canal del downlink. Puede contener infinidad de datos, entre ellos, los más importantes son: la frecuencia central, el identificador de la BS (BS Id) y los perfiles de ráfaga permitidos en el DL.
- UCD (Uplink Channel Descriptor): Como su propio nombre indica, se encarga de describir físicamente el canal del uplink. Entre los valores que puede definir se encuentran: los perfiles de ráfaga permitidos o la frecuencia central del canal de uplink.
- DL-MAP y UL MAP. Ambos son muy similares, salvo que en el UL-MAP se define el parámetro Allocation Start Time que indica el momento de la trama en el que comienza la subtrama de UL. Existe otra diferencia en el modo de retransmisión: mientras que en el DL-MAP se utiliza para definir el uso del DL en las zonas de acceso y transparente, el UL-MAP, únicamente se utiliza en la zona de acceso. Por lo demás, ambos pueden estar compuestos de uno (o varios) Elementos de Información (UL-MAP IE y DL-MAP IE) que definen los intervalos que conforman cada una de las subtramas (UL y DL). Cada uno de ellos, a su vez, está compuesto, entre otros campos, de:
  - El CID al que va dirigido ese intervalo, ya sea multicast, broadcast o dedicado.
  - El UIUC o DIUC, que identifica el tipo de mensaje en el intervalo. La mayoría se diferencian únicamente en el tipo de modulación a utilizar en el intervalo. Sin embargo, también hay otros mapas que sirven para tareas de coordinación de MIMO, HARQ o feedbacks de algún tipo.
  - La duración del mensaje en unidades de tiempos de símbolo OFDMA incluyendo los preámbulos.
  - El Start Time que indica el tiempo, en unidades de tiempos de símbolo OFDMA, (en el caso de los UL-MAP IE relativo al Allocation Start Time), donde comienza la región de tiempo especificada por el mensaje.

Con la definición de las redes multisalto, se ha tenido que definir una segunda trama de control que define la operación específica de las RS en los enlaces de retransmisión. Esta subtrama está compuesta por:

- R-FCH: Indica la longitud de la siguiente ráfaga en el Downlink (DL) de la zona de relay, en la que se describe la subtrama, por lo que el R-FCH ayuda a las RS a interpretar la primera ráfaga de la zona de retransmisión del DL. Tiene un símbolo de duración.

- RCD (Relay Link Channel Descriptor): Como su propio nombre indica, se encarga de describir físicamente el canal de retransmisión. Entre los valores que puede definir se encuentran: el momento de comienzo de la uplink de retransmisión y el “configuration action frame” que indica en que trama comienzan a aplicar dichos valores.
- R-MAP. Define el uso de los intervalos de UL y DL en los enlaces de retransmisión. El R-MAP es muy similar al DL-MAP, tiene que ir precedido R-FCH, y contiene los DL-MAP y UL-MAP de los enlaces de retransmisión.

#### 7.4.6. Códigos CDMA en sistemas retransmisores

En una red con retransmisores, éstos tienen un conjunto de códigos único asignado a ellas para cada una de las tareas que puedan realizar. De esta forma, la estación planificadora identifica de forma unívoca el origen y el motivo de la petición, lo que reduce el overhead y la latencia en distintos procesos. Estos códigos son asignados durante el proceso de inicialización de una estación retransmisora, dentro del mensaje RNG-RSP, tal y como se describe en la sección 7.1.3. A continuación, se listan algunas de las tareas para las que se podrían asignar códigos únicos:

- Estaciones no transparentes operando en modo centralizado que necesitan ancho de banda en su DL para enviar un RNG-RSP a una de sus SS.
- Estaciones no transparentes operando en modo centralizado que necesitan ancho de banda en su DL para enviar un RNG-RSP a una estación retransmisora por debajo de ella.
- Una estación transparente que necesita ancho de banda en el UL de retransmisión para enviar MR\_RNG-REP con la información de los códigos CDMA recibidos de sus SS.
- Una estación retransmisora intermedia que necesita ancho de banda en su UL para reenviar una Cabecera de Solicitud de Ancho de Banda.
- Una estación retransmisora intermedia que necesita ancho de banda en su UL para reenviar un informe de error de HARQ.

#### 7.4.7. Retransmisión Cooperativa

La retransmisión cooperativa puede ser proporcionada mediante la participación de la MR-BS y de una o más RS. Para ello, es necesario enviar las señales correctamente codificadas desde diferentes antenas de la MR-BS y las RS durante intervalos de transmisión dedicados a las estaciones subordinadas. El estándar define tres modos de retransmisión cooperativa: diversidad cooperativa de fuente, diversidad cooperativa en transmisión y diversidad cooperativa híbrida.

Para proporcionar diversidad cooperativa de fuente las antenas transmisoras envían simultáneamente la misma señal utilizando la misma referencia de tiempo y frecuencia. En el caso de diversidad cooperativa en transmisión, se utilizan señales codificadas mediante códigos de Alamouti (códigos espacio-temporales, STC, por sus siglas en inglés) enviadas utilizando el mismo recurso espacio temporal. La diversidad cooperativa híbrida, es similar anterior, salvo que en este caso al menos un valor asignado a las antenas virtuales, será asignado a múltiples antenas físicas.

La configuración de la retransmisión cooperativa se realiza a través del mensaje RS\_Config-CMD, que indica la antena a utilizar por cada RS, y de la creación de zonas STC en el DL en la que se usarán las matrices de codificación definidas en el IE correspondiente. Para que este mecanismo funcione correctamente, todas las transmisiones enviadas deben llegar a la estación durante el intervalo definido para ello.

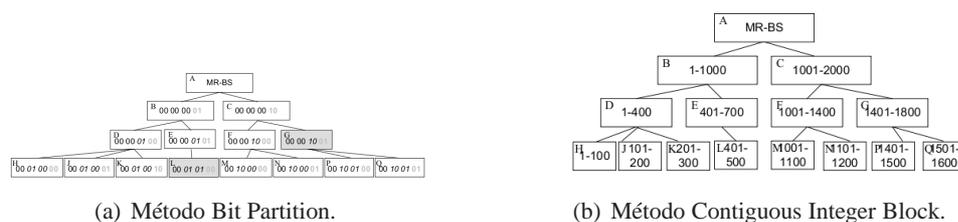


Figura 7.17: Métodos embebidos de señalización de caminos.

## 7.5. Mecanismos adicionales de la capa MAC

En este capítulo se describen mecanismos adicionales que incorpora la capa MAC en el estándar 802.16j para permitir un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. En concreto, en este capítulo se describirán, entre otros, los protocolos de establecimiento de caminos par alcanzar una estación determinada, los mecanismos de retransmisión de datos en redes 802.16j, la transmisión de preámbulos y r-ámbulos para sincronización y las estrategias de medición de interferencia.

### 7.5.1. Establecimiento de rutas

Basándose en la información que recibe durante el proceso de inicialización de las distintas estaciones en la red, la MR-BS se encarga de obtener las rutas existentes entre ella y una RS de acceso. Para la creación y señalización a las RS intermedias de estas rutas, el estándar define dos mecanismos distintos: el explícito y el embebido. A continuación se describirá cada uno de ellos.

#### 7.5.1.1. Establecimiento de rutas embebido

Este mecanismo consiste en la asignación sistemática de CID a las estaciones subordinadas, de forma que los CID asignados a sus estaciones subordinadas sean un subconjunto del CID de la estación. Dicha asignación es llevada a cabo por la estación base, que centraliza la asignación de todos los CID<sup>25</sup>. Por lo tanto, la topología de la red está embebida en una estructura sistemática de CID que ayude a las RS a encontrar la ruta hacia una estación sin tener que almacenar los CID de las estaciones subordinadas. Existen dos métodos para hacerlo denominados bit partition y contiguous integer block. Ambos se muestran en la Figura 7.17.

#### 7.5.1.2. Establecimiento de rutas explícito

Este mecanismo se utiliza para asignar rutas a conexiones de forma explícita, es decir, para crear una tabla de enrutamiento donde se indique para cada CID cuál es su siguiente salto. Dicho CID puede tratarse de un identificador de conexión de una SS ((Básico, primario, o de transporte) o del de una RS (básico, primario o de túnel).

Si se utiliza este mecanismo, una vez que una RS o una SS comienza a estar operativa dentro de la red, la MR-BS debe enviar un DSA-REQ a todas las RS en la ruta hacia ella para indicarles su presencia y actualizar la ruta que permita retransmitir correctamente los paquetes de control dirigidos esta nueva estación. Si se trata de la primera en una rama del árbol la MR-BS tendrá que asignarle un Path ID a la ruta entre la ella y la nueva estación. La MR-BS también puede eliminar rutas utilizando el mensaje

<sup>25</sup>En el caso de existir RS con capacidad de asignación local de CID, los CID que le asigne la MR-BS tienen que ser consistentes con este método.

DSD-REQ con el Path ID de la ruta a eliminar incluido. Cuando una RS recibe un DSA/DSD-REQ realiza la operación indicada y se lo reenvía a su estación subordinada en la ruta. Esta operación se repite hasta que el mensaje llega a la RS de acceso que es la encargada de confirmar la eliminación o la creación de la ruta mediante un DSA/DSD-RSP.

Cuando nuevas conexiones se generan, bien conexiones individuales de RS o SS o conexiones de túnel, las rutas deben ser actualizadas. Esto es debido a que un mismo Path ID puede servir para mapear múltiples CID. De esta forma la MR-BS puede asignar las nuevas conexiones a rutas ya existentes mediante un DSA-REQ enviado a todas las estaciones de la ruta incluyendo el Path ID. Igual que se pueden unir CID a rutas existentes, también se pueden separar. Esto se hace mediante un mensaje DSD-REQ.

## 7.5.2. Retransmisión de MAC PDU

El estándar define múltiples modos de retransmisión de los mensajes que se pueden agrupar en dos conjuntos: retransmisión basada en túneles y retransmisión basada en CID. Ambos se describen a continuación.

### 7.5.2.1. Retransmisión basada en túneles

Este modo es únicamente válido para las RS no transparentes. Los túneles se establecen entre la MR-BS y las RS de acceso tal y como se describe en 7.3.2.

Las conexiones asignadas para viajar dentro del túnel deben ser transmitidas siempre a través de ese túnel. Las MAC PDUs de dichas conexiones son encapsuladas dentro de una Relay MAC PDU en cuya cabecera (Relay MAC header) consta el CID del túnel. La estación de entrada en el túnel es la encargada de encapsular las MAC PDUs en una Relay MAC PDU, mientras que la estación de salida es la encargada de su eliminación. Cada CID de túnel está asociado a una ruta concreta indicada en el momento de su creación, por lo que las estaciones tendrán que reenviar los paquetes siguiendo dicha ruta.

En el modo distribuido son las propias estaciones las que se encargan de gestionar sus recursos para poder retransmitir los mensajes. En el apartado 7.3.4.2 se describieron los mecanismos para proporcionar QoS a los dos tipos de túneles que se pueden definir en modo de planificación distribuida.

En el modo centralizado, cuando la comunicación se realiza en el DL la MR-BS introduce en la Relay MAC PDU una Subcabecera de Asignación (Allocation Subheader) por cada RS intermedia y otra por cada CID de datos transportado dentro del túnel. Como se muestra en la Figura 7.18, esta subcabecera hace referencia a uno de los mensajes MAP que reciben las RS bien dentro del RS\_Access-MAP o del RS\_Relay-MAP que retransmiten para planificar las transmisiones de sus subordinadas. En concreto, hace referencia al DL-MAP IE que la RS tiene que utilizar para retransmitir la Relay MAC PDU. Cada RS tiene que comprobar que el DL-MAP IE al que hace referencia la Allocation Subheader existe antes de retransmitir los mapas. Si es así, elimina su Allocation Subheader de la Relay MAC PDU y la retransmite en el DL-MAP IE indicado. La RS de acceso recibe tantas Allocation Subheaders como CID en la Relay MAC PDU que le indican en que DL-MAP IE retransmitir las MAC PDUs de cada CID. Para la retransmisión de los mensajes en el UL, la RS sigue los mecanismos descritos en el apartado 7.3.4.2

### 7.5.2.2. Retransmisión sin usar túneles CIDs

En este modo, la retransmisión se realiza en función del CID que aparezca en la MAC PDU.

Si la red opera en modo no transparente distribuido, cada RS contiene una tabla con los CID que tiene que retransmitir y el CID de la RS a la que se lo tiene que reenviar. Por lo que cuando recibe un paquete, revisa esa tabla y lo reenvía conforme a su planificador.

Syntax	Size (bits)	Notes
Allocation subheader {	—	—
<b>Target Transmission Frame</b>	6	LSB 6 bits of frame number of the frame that RS shall transmit the MAC PDU.
<b>Allocation Index</b>	6	Allocation Index pointing to DL-MAP_IE in the RS_Relay-MAP and the RS_Access-MAP message.
<b>Number of MAC PDUs</b>	3	Number of MAC PDUs in this allocation.
<b>Continuation</b>	1	1: Another Allocation subheader follows 0: This is the last Allocation subheader for the RS.
}	—	—

Figura 7.18: Estructura de la Subcabecera de Asignaciones (Allocation Subheader).

Cuando la red opera en modo centralizado, la MR-BS tiene que determinar las asignaciones de todos los enlaces de su celda y enviar la planificación resultante a las RS en forma de mensajes MAP dirigidos al CID básico de cada una de ellas para que éstas los retransmitan a sus estaciones subordinadas. Las asignaciones que estos mensajes MAP contienen van dirigidos a los CID de transporte de las estaciones subordinadas.

Por otro lado, la RS reciben paquetes de datos que tienen que retransmitir cuyo identificador es un CID de transporte.

La recepción de los paquetes de datos a retransmitir y el mensaje que contiene los mensajes MAP con las asignaciones para hacerlo no tienen que recibirse de forma sincronizada. Por lo que, para que la retransmisión se realice de forma correcta la MR-BS tiene que proporcionar una referencia a la RS centralizada para que mapee las asignaciones a los datos a retransmitir en ellas.

Esta referencia se puede dar de tres formas distintas:

- La primera se denomina CID-based y consiste en que la MR-BS indique a cada RS en el RS\_Config-CMD el valor de su retardo fijo para retransmisión en el DL y en el UL (fixed forwarding delay). Este valor indica el número de tramas que la RS tiene que esperar para retransmitir un paquete de datos. Por ejemplo, si la RS recibe un paquete de datos en la trama X, y el valor de su DL fixed forwarding delay es Y, retransmitirá el paquete conforme a las asignaciones recibidas para la trama X+Y.

Las estaciones no transparentes al componer los mensajes MAP para sus estaciones subordinadas conocen los CID que van a tener que retransmitir en el UL, sin embargo, las estaciones transparentes no. Para comunicárselo, la MR-BS utiliza el mensaje RS\_Member\_List\_Update. Ante la recepción de este mensaje las RS tienen que confirmar su recepción mediante un MR\_Generic-ACK. Si alguna de las RS transparentes no contesta, la MR-BS utiliza el mecanismo denominado burst-based para comunicárselo.

- La segunda se denomina CID-based asistida y se utiliza en redes con RS no transparentes a las cuales se ha preferido no asignar el DL fixed forwarding delay. En este caso la MR-BS tiene que insertar un DL\_Allocation\_Reference IEs por cada mensaje MAP que retransmitirá la RS. Como se puede apreciar en la Figura 7.19, este IE consiste en indicarle a la RS qué paquetes tiene que retransmitir en cada asignación de su DL. Para ello la RS tiene que almacenar el número de trama en el que recibió cada paquete y su CID. Al recibir el DL\_Allocation\_Reference IE la RS retransmitirá en esa asignación un número de paquetes dirigidos a un CID concreto que recibió en unas tramas específicas. Cabe destacar que la asignación a la que hace referencia el

Syntax	Size (bits)	Notes
DL_Allocation_Reference_IE(){	—	—
Num_Connections	4	Number of connections included in the associated allocation.
For(i=0;i<Num_Connections;i++){	—	—
CID	16	CID of connection.
Num_Received_Frame	4	—
For(j=0;j<Num_Received_Frame;j++){	—	—
Received_Frame	4	LSB of frame number where the MAC PDUs are received by the RS.
Num_MAC_PDU	4	Total data allocated for this connection, in unit of MAC PDU.
}	—	—
}	—	—
Padding	<i>variable</i>	Padding to reach byte boundary.
}	—	—

Figura 7.19: Estructura del DL Allocation Reference IE.

DL\_Allocation\_Reference IE puede no ir dirigida a un CID concreto, sino broadcast, puesto que el IE puede contener información de varios CID. El mecanismo descrito también se utiliza para enlaces de relay en redes de más de dos saltos.

- El tercer mecanismo se denomina burst-based y consiste en que la MR-BS codifica los patrones de retransmisión dentro de los mapas. Para el caso de RS individuales, este mecanismo sólo lo utilizan las estaciones transparentes para la retransmisión de mensajes de control en el UL. Para ello se utiliza el UL\_Burst\_Receive IE, mostrado en la Figura 7.20, que es un mensaje MAP dirigido a una RS transparente donde se le indica que lo que se envíe en los n mensajes MAP siguientes lo tiene que recibir para retransmitirlo. La retransmisión de los datos recibidos se realiza en la siguiente asignación que reciba la RS en el UL.

Syntax	Size (bits)	Notes
UL_Burst_Receive_IE() {	16	—
Extended_UIUC	4	UL Burst Receive IE = 0x0B
Length	4	Length=1
Nr	8	Number of UL-MAP_IE following current IE for RS to receive data bursts from subordinate station(s)
}	—	—

Figura 7.20: Estructura del UL Burst Receive IE.

Tamaño del escalón $m$	Precisión requerida
$ m  = 1$ dB	$\pm 0,5$ dB
$ m  = 2$ dB	$\pm 1$ dB
$ m  = 3$ dB	$\pm 1,5$ dB
$4 \text{ dB} <  m  \leq 10 \text{ dB}$	$\pm 2$ dB

Cuadro 7.1: Precisión requerida en función del tamaño del escalón  $m$ .

### 7.5.3. Alineamiento Periódico

Una estación que ya se encuentra en estado operativo dentro de la red realiza de forma periódica alineamientos con su estación superordinada con el fin de utilizar los valores correctos de potencia y temporización. Para ello realizará un proceso similar al descrito en la sección 7.1.3 sólo que utilizando los ranuras y los códigos definidos para Alineamiento Periódico en vez de los Alineamiento Inicial. Se puede dar el caso también de que la estación superordinada, al recibir un paquete de una estación subordinada, considere que es necesario realizar modificaciones a su alineación. En este caso le enviará un RNG-RSP indicándole dichas modificaciones.

### 7.5.4. Control de Potencia Transmitida

El estándar 802.16-2009 indica que se debe soportar un algoritmo de control de potencia para el canal de UL que se base en una calibración inicial y de un procedimiento de ajuste periódico durante el cual no se pierdan datos. El primero se realiza mediante en la etapa de alineamiento inicial que se describió en el apartado 7.1.3, mientras que el segundo se realiza mediante el mecanismo de alineamiento periódico descrito en el apartado 7.5.3. En concreto para OFDMA, el estándar establece que para bandas no licenciadas el transmisor debe contar con un control escalonado del nivel de potencia a transmitir de mínimo 30 dBs y una precisión en función del escalón, tal y como se muestra en el Cuadro 7.5.4.

El sistema debe ser tal que permita soportar atenuaciones en la potencia debidas a la distancia o a las fluctuaciones de un máximo de 30 dB/s y caídas de un máximo de 10 dB, aunque la implementación del algoritmo depende del vendedor. Además, tiene que tener también en cuenta la interacción del amplificador de potencia con los distintos perfiles de ráfaga utilizados<sup>26</sup>. Es decir, cuando se cambia de un perfil de ráfaga a otro se deben mantener unos márgenes para evitar la saturación del amplificador y prevenir la violación de las máscaras de emisión.

En el caso de OFDMA, las estaciones cliente deben mantener la misma densidad espectral de potencia, es decir, si baja el número de subportadoras que conforman la asignación, la potencia transmitida debe ser reducida proporcionalmente. De igual forma, cuando se incrementa el número de subportadoras, de la misma forma aumentará la potencia. Para que la BS también mantenga la densidad espectral de potencia de forma consistente, puede indicar durante el alineamiento periódico la potencia a transmitir y el perfil de ráfaga que le interesa que utilice la SS. Para ello la SS deberá reportar periódicamente la potencia que está transmitiendo mediante mensajes Channel Measurement REP-RSP. Como se indicó en 7.1.4, la BS obtiene el dato de la máxima potencia que puede transmitir una SS del mensaje SBC-REQ, que ésta le envía durante su inicialización. Sin embargo, la potencia nunca debe superar los límites establecidos por los marcos regulatorios, o aquellos que puedan provocar una deformación de la señal.

<sup>26</sup>WiMAX utiliza modulación adaptativa, y cada perfil de ráfaga define la modulación y la codificación a utilizar en función de las características del canal. Se han definido 4 modulaciones posibles: BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM y tres combinaciones distintas de codificación FEC: 1/2, 2/3 y 3/4

En el caso de las redes multisalto, la enmienda indica que es obligatorio que se implementen algoritmos de control de potencia para el canal de UL tanto desde las RS como desde las SS. En ambos casos, dicho algoritmo, al igual que ocurría para PtMP, tiene que contar con una calibración inicial y con ajustes periódicos que se puedan llevar a cabo sin que se pierdan datos. Además, las RS también deben llevar a cabo control de potencia en sus enlaces del DL.

Para las RS que operan en modo centralizado, el algoritmo control de potencia del UL debe estar ubicado en la MR-BS, para así poder controlar la potencia transmitida en todos los canales de UL, tanto los servidos por ella, como aquellos que coordinan todas sus RS subordinadas. Cuando se trabaja en una red donde con RS operando en modo distribuido, éstas serán las encargadas de ejecutar el algoritmo control de potencia en el UL de sus subordinadas, y la MR-BS será la encargada de ejecutarlo para controlar la potencia que emiten las estaciones de la celda que ella controla.

En cuanto al intercambio de mensajes, las RS tendrán que ser capaces de recibir mensajes de control de potencia con las correcciones que tienen que llevar a cabo tanto en el UL como en el DL para que la red funcione correctamente. Para ello, las RS centralizadas tienen que ser capaces de ejecutar medidas sobre la calidad del canal para que la MR-BS lo tenga en cuenta en sus decisiones. Esto no es requerido para las RS distribuidas ya que son ellas las que generan los mensajes que envían a sus SS subordinadas.

### 7.5.5. Preámbulos y R-ámbulos

Para mantener la sincronización en cada celda, el primer símbolo que se envía en el DL consiste en el preámbulo. En OFDMA, para cada tamaño de FFT (2048, 1024, 512 y 128) hay tres conjuntos de subportadoras moduladas que conforman el preámbulo, cada uno de los cuales será utilizado en un segmento distinto. En cada conjunto se modula cada tercera subportadora, comenzando cada uno desde una distinta, mediante una BPSK aumentada con un código de pseudo ruido (PN). En función del segmento que se utilice y el identificador de celda, el estándar define 114 preámbulos distintos (la información de cada subportadora es distinta) para cada tamaño de la FFT. Cada uno de estos preámbulos se identifica con un índice.

En redes multisalto en las zonas de retransmisión se utiliza el R-ámbulo. Éste se obtiene a partir del preámbulo utilizado en la zona de acceso. A partir del índice de éste, se realizan una transformaciones en función del tamaño de la FFT y se obtiene el R-ámbulo, que se identifica con el mismo índice.

El R-ámbulo tiene fundamentalmente dos funciones:

1. Mantener sincronizadas en tiempo y frecuencia a las RS subordinadas. Es decir, una vez realizada la sincronización inicial, la RS tiene que comprobar que continua sincronizada al menos cada 40 milisegundos.
2. Permitir a un RS monitorizar su vecindad. Es decir, monitorizar los R-ámbulos transmitidos por sus RS vecinas.

Si en la red se utiliza sincronización común, tal y como se describe en 7.5.5.3, entonces no se transmite el R-ámbulo en esa trama, por lo que los esquemas de transmisión y monitoreo que se describen a continuación tienen que tener en cuenta esto para que no haya solape.

#### 7.5.5.1. Esquema de repetición del R-ámbulo para sincronización

El patrón de repetición del R-ámbulo para mantener la sincronización está basado en dos parámetros:

1. La longitud del Ciclo de Sincronización representado por N, indica cada cuántas tramas una estación tiene que enviar su R-Ámbulo.

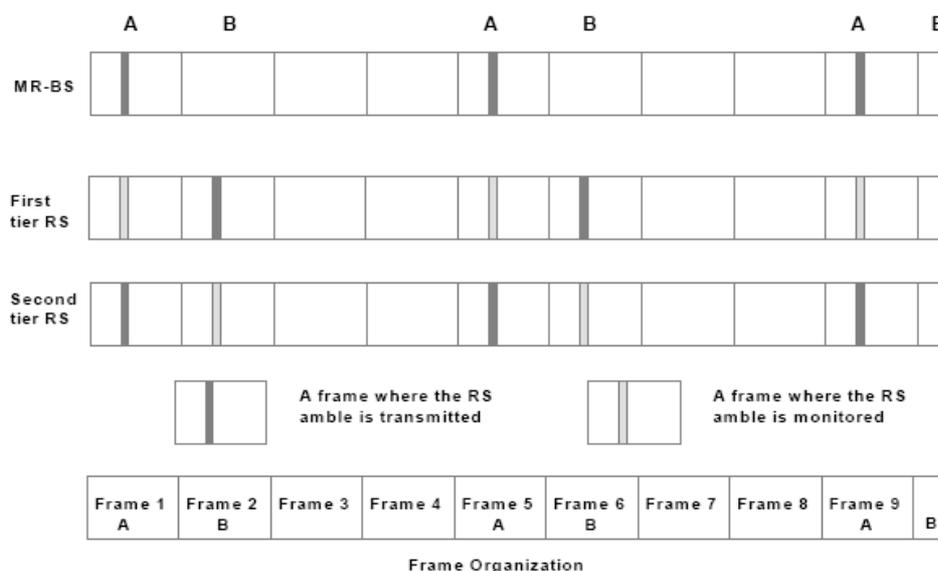


Figura 7.21: Ejemplo de sincronización mediante R-ámbulo.

2. Constante de desplazamiento de sincronización, denominada  $K_s$ .

Para obtener el patrón de repetición, el primer paso lo realiza la MR-BS al calcular el tercer parámetro necesario, el `Modulo_Frame_Offset`, para cada RS. Éste se calcula como el módulo en base  $N$  de la diferencia entre el número de trama utilizado en la MR-BS y aquel utilizado en la RS. Los tres parámetros son comunicados a cada RS dentro del `RS_Config-CMD`.

A partir de estos tres parámetros, las RS tienen que calcular el `Computed_Frame_Number`:

$$\text{Computed\_Frame\_Number} = \text{Frame\_Number}(\text{RS}) - \text{Modulo\_Frame\_Offset};$$

Una vez obtenido el `Computed_Frame_Number`, las RS tienen que determinar cuál de las dos secuencias para la transmisión del R-ámbulo existentes utilizan:

1. Las RS utilizan la secuencia A cuando se cumple:  

$$(\text{modulo } N \text{ de } \text{Computed\_Frame\_Number}) + 1 = 1$$
2. Las RS utilizan la secuencia B cuando se cumple:  

$$(\text{modulo } N \text{ de } \text{Computed\_Frame\_Number}) + 1 = K_s$$

Cada RS que soporte la sincronización de RS subordinadas tiene que transmitir sus preámbulos bien utilizando la secuencia A o la B, mientras que la MR-BS puede utilizar cualquiera de las dos. Las RS que se inicializan en la red buscan el preámbulo de su estación superordinada en las tramas indicadas por ambas secuencias. Una vez determinada la secuencia, debe continuar manteniendo la sincronización. Cuando la RS que se inicializa se vuelve operativa, utilizará la secuencia contraria a la utilizada por su estación superordinada. En la Figura 7.21 se muestra un ejemplo para  $N=4$  y  $K_s=2$ .

### 7.5.5.2. Esquema de repetición del R-ámbulo para monitorización

Cuando este esquema es especificado por la MR-BS dentro del `RS_Config-CMD`, las RS tienen que enviar el R-ámbulo en las tramas indicadas por la secuencia C dentro del Ciclo de Monitorización de la Vecindad. La duración del Ciclo de Monitorización de la Vecindad viene determinado por  $M$ , que indica el número de tramas en las que se transmite el R-ámbulo, y por  $L$ , que indica cada cuántas tramas éste es

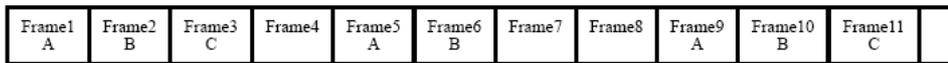


Figura 7.22: Ejemplo de monitorización y sincronización conjunta.

enviado. El desplazamiento viene dado por la variable  $K_m$ . Es decir, las RS utilizan la secuencia C para la transmisión del R-ámbulo, cuando se cumple:  $(\text{moduloLdeComputed\_Frame\_Number}) + 1 = K_m$ .

Cada vez que se especifique este esquema, existirán tanto Ciclos de Monitorización de la Vecindad, como aquellos que entren dentro del intervalo “Monitoring Duration”.

De las  $M$  posibles posiciones dentro del ciclo donde una RS puede transmitir el R-ámbulo, cada RS elige aleatoriamente una de ellas para monitorear a sus RS vecinas. Por lo que dentro de cada ciclo las RS transmitirán el R-ámbulo en  $M-1$  tramas.

Si la RS puede escuchar a su superordinada este esquema también se puede utilizar para sincronización. De igual forma, los R-ámbulos de sincronización se pueden utilizar para monitorización. Además, ambos esquemas se pueden compatibilizar con la correcta elección de los parámetros. En la Figura 7.22 se muestra un ejemplo para  $N=4$ ,  $L=8$ ,  $K_s=2$  y  $K_m=3$ .

### 7.5.5.3. Símbolo de Sincronización Común

En OFDMA la MR-BS puede utilizar el último símbolo del DL de cada cuarta trama para la sincronización de la red para las FFT de 1024, 512 y 128. Para ello envía un símbolo conocido por todos que permite la sincronización común.

### 7.5.6. Descubrimiento de la vecindad por la RS

La MR-BS puede solicitar a una RS que realice una medición sobre la intensidad de señal que recibe de cada estación vecina. Para ello, la RS puede obtener la información de identificación de cada uno de ellos del MR\_NBR-INFO. Este mensaje lo envía la MR-BS a una RS y puede contener:

- la lista de todos los vecinos de una RS
- los vecinos a añadir a una lista ya existente
- los vecinos a eliminar de una lista ya existente
- información sobre determinados vecinos que hay que actualizar

Este mensaje contiene datos identificativos de cada vecino a añadir entre los que destacan: su BSID, sus índices de preámbulo y R-ámbulo, sus servicios de planificación soportados, el offset de su zona de Relay (es decir, donde empieza su zona de Relay), y su PHY mode ID, que indica el ancho de banda que utiliza, el tamaño de la FFT, el prefijo cíclico y la duración de trama.

A partir de este mensaje, por tanto, la RS puede comenzar a escanear el preámbulo, y si esta presente, el R-ámbulo, e informar a la MR-BS de la potencia recibida de cada uno de ellos.

Como no todas las RS transmitirán su preámbulo, y como para realizar dicha monitorización la RS tiene que obtener las medidas de todas sus vecinas, la MR-BS puede forzar a todas a hacerlo. Para ello existen dos mecanismos:

- Patrones de repetición de transmisión y monitorización de R-ámbulos, tal y como se describió en la sección 7.5.5.2.

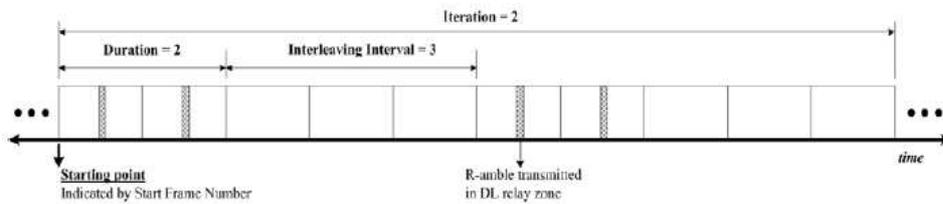


Figura 7.23: Ejemplo de esquemas pre-planificados de transmisión y monitorización de R-ámbulo.

- Esquema centralizado de transmisión y monitorización de R-ámbulos como los descritos en el siguiente apartado.

### 7.5.6.1. Esquema centralizado de transmisión y monitorización de R-ámbulos

La monitorización bajo este esquema consta de varios pasos:

1. En primer lugar, la MR-BS envía un RS\_Config-CMD a todas las RS implicadas en el que se encuentran los parámetros del proceso: número de estaciones involucradas, duración del esquema, intervalo entre cada transmisión y número de iteraciones. Este mensaje también indica qué estaciones transmiten y qué estaciones reciben en cada iteración, identificándolas por el índice de preámbulo que se les asignó cuando entraron en la red. El comienzo del proceso entre las RS involucradas tendrá lugar en el momento indicado por el campo Frame Action Number del RS\_Config-CMD.
2. A continuación, conforme a las ordenes recibidas cada RS transmite o recibe su R-ámbulo en las tramas indicadas en cada iteración.
3. Por último, al finalizar el Ciclo de Monitoreo, las RS realizan su informe de medidas y se lo envían a la MR-BS

En la Figura 7.23 se muestra un ejemplo en el que una RS transmite su R-ámbulo conforme a un ciclo con Duración=2, Intervalo entre cada Transmisión=3 y número de Iteraciones=2.

### 7.5.7. Medición de las interferencias en Redes Multisalto

Para la estimación de las interferencias en redes multisalto el estándar define dos mecanismos. El primero consiste en la predicción de la interferencia a través de las mediciones de la señal recibida de los vecinos. El segundo mecanismo, que es opcional, consiste en utilizar sondeos en el UL para medir la interferencia. A continuación se describe cada uno de ellos.

#### 7.5.7.1. Predicción de la interferencia a través de las mediciones de la señal recibida

Este mecanismo se basa en la utilización de la información de la RSSI reportada dentro del mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP. Para ello:

1. Predice la interferencia más potencia de ruido recibido por la estación #i. Este valor se podría calcular como el sumatorio de:
  - a) El ruido térmico más el ruido de interferencia de fondo recibido por la estación #i
  - b) La potencia de señal que no se pretendía que recibiera la estación #i, pero realmente recibida (obtenido del RS\_NBR\_MEAS-REP).

2. Predice la SINR recibida en la estación #i como el ratio entre:
  - a) La potencia de señal transmitida a la estación #i , entre
  - b) El valor obtenido en el paso 1.

### 7.5.7.2. Medición de interferencia mediante sondeos en el UL

Como un mecanismo alternativo al anterior, más fiable, pero más complejo, el estándar describe los sondeos en el UL. Éstos se basan en que la MR-BS coordina que algunas estaciones de su celda transmitan en una zona determinada de la trama y otras (la MR-BS incluida) midan la interferencia existente en el canal, basándose en la reciprocidad del mismo. Para poder utilizar este mecanismo las estaciones deben soportar la opción de Channel State Information at the Transmitter.

Este mecanismo se puede utilizar para mejorar las prestaciones del enlace, su fiabilidad, e incluso su rango. Además, permite a la MR-BS conocer el estado canal a lo largo del ancho de banda, con el fin de poder utilizar aquellas porciones que tengan mejor respuesta.

Para poner en funcionamiento este mecanismo la MR-BS debe solicitar a determinadas estaciones que envíen señales de sondeo de forma periódica. Para ello, lo primero es habilitar una zona en el UL para el envío de señales de sondeo a través del PAPR\_Reduction\_Safety\_and\_Sounding\_Zone\_Allocation IE. A continuación, debe indicar a cada estación que participe en los sondeos los detalles específicos de su transmisión a través de un UL\_Sounding\_Command IE. Este puede ser de dos tipos:

- En el de tipo A se le indica a las estaciones qué señales de sondeo han de transmitir en el intervalo indicado por el mensaje, y en qué bandas de frecuencia tiene que hacerlo. Para este tipo, la banda de frecuencia dentro de la zona de sondeo se divide en bandas de sondeo no solapadas de 18 subportadoras contiguas cada una. Además, esta opción permite el uso de dos métodos para mantener la ortogonalidad cuando se multiplexan los sondeos de varias estaciones.
  - La primera se llama “cyclic shift separability” y engloba a las estaciones que ocupan todas las subportadoras dentro de una banda de sondeo. Éstas comparten la secuencia de sondeo, pero al utilizar distintas bandas no interfieren entre sí. La banda que utilizan va rotando en cada transmisión.
  - En la segunda cada estación ocupa una fracción del conjunto de subportadoras. Múltiples estaciones pueden utilizar la misma banda, pero cada una usa un conjunto de subportadoras no solapadas dentro de cada asignación.
- En el de tipo B, las bandas de frecuencia son asignadas de acuerdo al esquema de permutación utilizado en el DL. En esta opción no se permite multiplexación.

Además del envío de las señales de sondeo en el UL, si la MR-BS se lo indica, las estaciones de su celda pueden incluir su estimación sobre el canal de DL. Para ello, las estaciones tienen que codificar dichos valores y transmitirlos en los símbolos que sean necesarios justo después del envío de las señales de sondeo. De esta forma, la MR-BS puede calcular los mismos valores a través de las señales de sondeo, compararlos con los percibidos por las estaciones en el DL y actuar en consecuencia.

En el modo Relay también se pueden utilizar los mecanismos de sondeo para estimar la interferencia y las pérdidas de propagación entre las RS y la MR-BS. Para predecir las interferencias entre las diferentes celdas de retransmisión, la MR-BS necesita recolectar información de cada RS y puede que de cada MS. Para ello, la MR-BS sigue los siguientes pasos:

- En primer lugar manda un Channel Measurement REP-REQ a aquellas estaciones que vayan a participar en las mediciones en el que les indica el tipo de información que tiene que recolectar.

- A continuación, envía un PAPR\_Reduction\_Safety\_and\_Sounding\_Zone\_Allocation IE para definir el intervalo en el que se van a tener lugar las mediciones.
- Acto seguido, la MR-BS envía un UL\_Sounding\_Command IE dando las indicaciones pertinentes sobre la transmisión de las señales de sondeo a los participantes. Este mensaje indica quién transmite y quién recibe los mensajes de sondeo.
- Una vez terminadas las mediciones, las estaciones envían los valores dentro de mensajes Channel Measurement REP-RSP.

#### 7.5.8. Baja de una RS en la red

Una RS puede dejar de estar registrada en una red en cualquier momento, pero antes de hacerlo debe transferir el control de sus estaciones subordinadas a otra estación del sistema. Para ello debe enviar un mensaje DREG-REQ a la MR-BS, quien decide si lo acepta o no. En caso afirmativo, envía un DREG-CMD a la RS y comienza los procesos de handover necesarios para que las SS no pierdan conectividad. Una vez finalizado envía otro DREG-CMD para confirmarlo. El mensaje DREG-CMD también se utiliza para rechazar que una RS se de de baja, indicando en él, el motivo.

#### 7.5.9. Información de la ubicación de las estaciones

Ya sea por decisión propia de la MR-BS o por petición de una RS, la MR-BS puede solicitar al resto de las RS de la red que reporten su ubicación mediante el mensaje MR\_LOC-REQ. Este mensaje puede servir para que lo indiquen en un momento dado, o para que lo hagan de forma periódica. En el mensaje de respuesta, MR\_LOC-RSP, las estaciones han de incluir su posición con respecto al World Geodetic System 1984.

### 7.6. Conclusión

Después de un análisis pormenorizado de los mecanismos que se definen en la enmienda IEEE 802.16j, la única referencia que se ha encontrado a la utilización de bandas licenciadas ha sido en el parámetro “support of a second carrier frequency at RS”, que sirve para indicar si una RS va a utilizar una frecuencia distinta en la retransmisión. Al especificar la frecuencia central el estándar indica claramente las bandas de 2,3 y 3,5<sup>27</sup>. Por tanto, en la propuesta habrá que incluir por tanto que se actualice esta tabla y se incluyan las frecuencias centrales de los canales utilizables en la banda de 5 GHz. Por lo demás, no se ha encontrado ninguna otra indicación en los mecanismo que limite la operación de estos mecanismos a la operación en bandas licenciadas.

---

<sup>27</sup>Para más información consultar la sección 7.4.2.



## 8 Marco Regulatorio Internacional en la banda de 5 GHz

El estándar 802.16-2009 permite la operación en bandas libres de licencia, es decir, en aquellas bandas de frecuencia que pueden ser utilizadas sin ningún coste con el compromiso de cumplir una serie de requisitos que limiten sus interferencias con redes cercanas. En concreto el PHY WirelessHUMAN define la posibilidad de operar en la banda de 5 a 6 GHz.

La operación de una tecnología inalámbrica en una banda de frecuencias determinada suele estar altamente controlada por los organismos regulatorios internacionales. En el caso de la banda de 5 GHz, tanto la ERC [56], como la FCC [57], han determinado que para que ésta puede ser usada sin licencia, pero ha de cumplir con una serie de requisitos para no interferir con usuarios que previamente hacían uso de la banda. En la Figura 8.1, se muestran los servicios que la ITU-R propone para el trabajo en esta banda para cada una de las regiones.

Según la Regulación Radio 5,510 de la ITU [58], dentro de este rango de frecuencias se encuentra una de las bandas ISM, en concreto la banda 5725-5875 MHz (con frecuencia central en 5800 Mhz). Las bandas ISM fueron creadas para la aplicación de equipos o de instalaciones destinados a producir y utilizar en un espacio reducido energía radioeléctrica con fines industriales, científicos, médicos, domésticos o similares, con exclusión de todas las aplicaciones de telecomunicación. Por lo tanto, cuando a mediados de los 90 comenzaron a preverse las posibles aplicaciones de las redes inalámbricas de área local de banda ancha, éstas ya contaban con unas bandas en las que operar.

Sin embargo, con la expansión de este tipo de redes se llegó a la conclusión de que el espectro asignado a estas aplicaciones era insuficiente para su potencial y se comenzaron a tomar medidas al respecto. En una primera aproximación se decidió que lo óptimo sería ampliar las bandas de operación, pero antes de llevarlo a cabo, se realizaron una serie de estudios de compatibilidad con los sistemas ya existentes.

Por un lado, la ERC concluyó que se podían asignar las bandas 5150-5350 Mhz y 5470-5725 Mhz para el uso de redes locales inalámbricas de banda ancha, siempre y cuando éstas cumplieran una serie de requisitos mínimos para no interferir con los servicios primarios existentes en esas bandas [59]. Por su parte, la FCC llegó a unas conclusiones similares y creo las bandas U-NII, en las frecuencias 5,150-5,350 y 5470-5875 para el despliegue de este tipo de redes [60]. Los usuarios primarios que estaban haciendo uso previamente de parte de esas bandas de frecuencia eran radares militares y meteorológicos, servicios de exploración de la Tierra por satélite (EESS, por sus siglas en inglés) o servicios de investigación espacial (SRS).

Por lo tanto, para garantizar la coexistencia de los citados servicios con las redes de acceso inalámbrico, ambas instituciones propusieron dos mecanismos: la selección dinámica de frecuencia (DFS, por sus siglas en inglés) y control de la potencia transmitida (TPC) [57, 56]. A continuación se presentan ambas técnicas junto con otros mecanismos auxiliares para la reducción de interferencias.

### 8.1. Selección Dinámica de Frecuencias

Técnicamente, la Selección Dinámica de Frecuencias (DFS por sus siglas en inglés) está definida por una serie de algoritmos que facilitan la compartición de las bandas libres de frecuencias entre tráfico

Table of Frequency Allocations 4990-5925 MHz (SHF)		
International Table		
Region 1 Table	Region 2 Table	Region 3 Table
4990-5000 FIXED MOBILE except aeronautical mobile RADIO ASTRONOMY Space research (passive)		
5.149		
5000-5010 AERONAUTICAL RADIONAVIGATION RADIONAVIGATION-SATELLITE (Earth-to-space)		
5.367		
5010-5030 AERONAUTICAL RADIONAVIGATION RADIONAVIGATION-SATELLITE (space-to-Earth) (space-to-space) 5.328B 5.443B		
5.367		
5030-5150 AERONAUTICAL RADIONAVIGATION		
5.367 5.444 5.444A		
5150-5250 AERONAUTICAL RADIONAVIGATION FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) 5.447A MOBILE except aeronautical mobile 5.446A 5.446B		
5.446 5.447 5.447B 5.447C		
5250-5255 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) RADIOLOCATION SPACE RESEARCH 5.447D MOBILE except aeronautical mobile 5.446A 5.447F		
5.447E 5.448 5.448A		
5255-5350 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) RADIOLOCATION SPACE RESEARCH (active) MOBILE except aeronautical mobile 5.446A 5.447F		
5.447E 5.448 5.448A		
5350-5460 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) 5.448B SPACE RESEARCH (active) 5.448C AERONAUTICAL RADIONAVIGATION 5.449 RADIOLOCATION 5.448D		
5460-5470 RADIONAVIGATION 5.449 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) SPACE RESEARCH (active) RADIOLOCATION 5.448D		
5.448B		
5470-5570 MARITIME RADIONAVIGATION MOBILE except aeronautical mobile 5.446A 5.450A EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) SPACE RESEARCH (active) RADIOLOCATION 5.450B		
5.448B 5.450 5.451		
5570-5650 MARITIME RADIONAVIGATION MOBILE except aeronautical mobile 5.446A 5.450A RADIOLOCATION 5.450B		
5.450 5.451 5.452		
5650-5725 MOBILE except aeronautical mobile 5.446A 5.450A RADIOLOCATION Amateur Space research (deep space)		
5.282 5.451 5.452 5.454 5.455		
5725-5830 FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) RADIOLOCATION Amateur	5725-5830 RADIOLOCATION Amateur	
5.150 5.451 5.453 5.455 5.456	5.150 5.453 5.455	
5830-5850 FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) RADIOLOCATION Amateur Amateur-satellite (space-to-Earth)	5830-5850 RADIOLOCATION Amateur Amateur-satellite (space-to-Earth)	
5.150 5.451 5.453 5.455 5.456	5.150 5.453 5.455	
5850-5925 FIXED FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) MOBILE	5850-5925 FIXED FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) MOBILE Amateur Radiolocation	5850-5925 FIXED FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) MOBILE Radiolocation
5.150	5.150	5.150

Figura 8.1: Servicios en la banda de 5GHz.

Parámetro	Valor
Channel Availability Check Time	Mínimo 60 segundos
Interference Detection Threshold	*
Channel Move Time	Máximo 10 segundos
Channel Closing Transmission Time	Máximo 260 ms**
Non-Occupancy Period	Mínimo de 30 minutos.

Cuadro 8.1: Valores de los parámetros DFS

\* Se define en la tabla 8.2. \*\* 200 ms al principio y otros 60 entre el tiempo restante hasta llegar a Channel Move Time.

gubernamental (usuarios primarios o específicos) y comercial (usuarios secundarios). Funcionalmente, DFS es un proceso a través del cual se alerta al sistema comercial de que se está interfiriendo con una comunicación de un radar gubernamental en un canal dado.

Una red que utiliza DFS sigue una arquitectura en modo infraestructura, en la cual cada vez que el maestro detecta una señal de radar, realiza una serie de eventos para dejar libre ese canal y mover la operación de la red a uno nuevo. Esto permite a las señales gubernamentales trabajar en el canal que tenían asignado previamente.

El funcionamiento de DFS no es muy complicado pero para explicarlo de forma sencilla es necesario introducir primero las definiciones de los parámetros en los que se basa [61].

- *Channel Availability Check Time*. Período de tiempo que el canal está libre de señales de radar antes de transmitir. Si lo está le señala a las estaciones cliente que las transmisiones van a comenzar.
- *Interference Detection Threshold*. El mínimo nivel de señal que ha de detectar, asumiendo una antena de 0dBi, para iniciar la secuencia de eventos para cambiarse de canal.
- *Channel Move Time*. Tiempo máximo en el que un equipo debe dejar vacío dicho canal. Se mide desde que finaliza la ráfaga del usuario específico, hasta que finaliza la última transmisión en el canal.
- *Channel Closing Transmission Time*. Este es el total de tiempo de transmisión máximo permitido durante el *Channel Move Time*.
- *Non-Occupancy Period*. Para asegurar que no se ha interrumpido la transmisión de un usuario específico, un canal en el cual se ha detectado dicha transmisión, se ha de dejar libre durante *Non-Occupancy period*.

El valor todos estos parámetros es similar para ambas administraciones y se muestra en el Cuadro 8.1, excepto para *Interference Detection Threshold* para el que existen pequeñas diferencias entre la CEPT y la FCC. Mientras que la FCC sólo indica que es obligatorio que las estaciones maestro tengan esta capacidad, para la CEPT es también obligatorio que la tengan las estaciones cliente cuya potencia de transmisión sea superior a 200 mW. Los valores de este parámetro se muestran en el Cuadro 8.2.

La operación en una red con DFS activado ha de seguir una secuencia cerrada de eventos que se basa en los parámetros definidos:

1. El maestro que quiere iniciar una comunicación tiene que seleccionar un canal y monitorizarlo durante un cierto período de tiempo (*Channel Availability Check Time*) durante el cual no ha de detectarse ninguna otra comunicación.

2. Si se detecta interferencia, el maestro repite el proceso descrito en 1 con otro canal, y añade el canal anterior a una lista donde se encuentran los canales con comunicaciones de usuarios específicos.
3. Si no se ha detectado interferencia, se comienza a operar en ese canal.
4. Una vez que haya comenzado la transmisión los sistemas que tengan activado DFS tienen que seguir monitorizando la red en busca de este tipo de señales, a lo que en el estándar se denomina *In-Service Monitoring*. Si se detecta, el maestro debe ordenar a todos los clientes que finalicen sus transmisiones y añadir el canal a la lista de canales con usuarios específicos.
5. El maestro selecciona un nuevo canal y repite el proceso.
6. Si ha transcurrido el *Non-Occupancy Period* de algunos de los canales, éstos pasan a la lista de canales disponibles.

Un último concepto que es obligatorio para los sistemas que implementen DFS es el *Uniform Spreading*. Éste sirve para que la carga en el espectro se reparta de manera equitativa entre todos los canales de la banda. Es decir, los equipos, en el largo plazo, tendrán que haber transmitido de una forma equivalente en todos los canales de la banda en la que trabajan.

## 8.2. Control de Potencia Transmitida

El control de la potencia transmitida (TPC por sus siglas en inglés) por un dispositivo ha sido, y sigue siendo, una de las mayores preocupaciones en la implementación de sistemas inalámbricos, independientemente de la tecnología a utilizar. El control de la potencia de transmisión hace referencia a mecanismos inteligentes usados para seleccionar dicha potencia de forma que logren unas buenas prestaciones dentro de un sistema de comunicaciones.

Sin embargo, al ser el control de potencia independiente a la tecnología, el concepto de buenas prestaciones dependerá del contexto y de la tecnología a utilizar. Para algunos casos, el control de potencia puede incluir optimizar la tasa de datos en un enlace, y por lo tanto la capacidad de la red; mientras que para otros puede significar ampliar la cobertura y el rango de la misma, o incluso aumentar la vida útil de los dispositivos utilizados o de la red.

El interés por el control de potencia es debido al compromiso que hay que mantener entre los beneficios y los inconvenientes del aumento de la misma. Por un lado, incrementar la potencia de transmisión supone una mejora de la calidad de la señal recibida, ya que supone un aumento de la relación señal a ruido (SNR), lo que suele implicar una reducción de la tasa de error de bit (BER) en el receptor. En el caso de las tecnologías que utilizan técnicas de transmisión en función de la calidad del canal, el aumento de la SNR supone a su vez un aumento de la tasa de transmisión de datos y, por lo tanto, un aumento de la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones. Sin embargo, el aumento de la

Interference Detection Threshold	Maestro	Cliente
FCC	-64 dBm; Pt >200mW	-64 dBm; Pt >200mW *
	-62 dBm; Pt <200mW	-62 dBm; Pt <200mW
CEPT	-64 dBm; Pt >200mW	-64 dBm; Pt >200mW
	-62 dBm; Pt <200mW	

Cuadro 8.2: Valores del Interference Detection Threshold

\* No es obligatorio que el cliente tenga detección de radar, pero si la tiene ha de cumplir los siguiente umbrales.

	Opción 1	Opción 2
Potencia Máxima del Transmisor	250 mW (24 dBm)	$11 + 10 \log B^*$ (dBm)
PIRE máxima	1 W (30 dBm)	$17 + 10 \log B^*$ (dBm)

Cuadro 8.3: Limitaciones de la ITU para la operación en la banda 5470-5570 MHz.

\* B es el 99% del ancho de banda del canal (MHz).

potencia transmitida también supone un aumento de la potencia consumida por un dispositivo, lo que constituye un limitante en el diseño de dispositivos móviles o para aquellos que han de ser alimentados de forma autónoma (como aquellos desplegados en zonas rurales y aisladas de países en desarrollo que han de ser alimentados con energía solar o eólica). Por otro lado, a mayor potencia transmitida, mayor es la interferencia producida en otros sistemas que utilicen la misma banda, lo que supone un gran problema en bandas libres de licencia, donde cualquier usuario puede comenzar a transmitir en una banda en la que previamente existían otros dispositivos operando y crear interferencias muy perjudiciales en sus comunicaciones.

Por lo tanto, no es simple proporcionar una respuesta al problema del control de la potencia de transmisión, ya que existirán tantos algoritmos para su optimización que mantengan un equilibrio entre los beneficios y los inconvenientes descritos, como situaciones concretas en las que una tecnología específica quiere ser usada en un contexto determinado con unos requisitos concretos.

En el caso que nos concierne, la banda de 5 GHz, la ITU define en la recomendación ITU-R1653 [62], que el TPC se debe utilizar de forma obligatoria para reducir las interferencias en otros sistemas operando anteriormente en la misma banda, fundamentalmente sistemas satelitales. En concreto, se han de utilizar mecanismos para lograr una reducción de la potencia combinada de al menos 3 dB a lo largo de la huella del satélite. A esto añade, que si no se aplica el TPC, la potencia transmitida debe reducirse en 3 dB.

En Europa, el mecanismo TPC es obligatorio según [56]. La función del mecanismo TPC es la indicada por la ITU, es decir, asegurar un factor de mitigación de al menos 3 dB en la potencia de emisión agregada proveniente de un gran número de dispositivos. Para ello se requiere que estos tengan la capacidad de operar en un rango de al menos 6 dB por debajo de la máxima PIRE admitida.

En el caso de la FCC también es obligatorio el empleo de mecanismos de TPC en los sistemas que operan en las bandas 5.25-5.35 GHz y 5.47-5.725 GHz, en concreto para proteger a los sistemas EESS y SRS [57]. En este caso, además, proporciona una nueva definición de TPC. La describe como la característica que permite ajustar la potencia de transmisión de un equipo, en función del nivel de señal presente en el receptor: cuando el nivel de la señal sube o baja, la potencia transmitida disminuye o aumenta. De esta forma, TPC permite que el transmisor opere a menor potencia que la máxima permitida cuando con un nivel de señal menor se puedan proporcionar servicios similares. Al igual que en el caso de Europa, la FCC define que los sistemas tengan la capacidad de operar al menos 6 dB por debajo del valor máximo de la PIRE. Sin embargo, también añade, que el mecanismo TPC no es necesario para sistemas cuya PIRE sea menor de 500 mW.

### 8.3. Límites en la potencia máxima radiada

Como se ha podido observar en el apartado anterior, los requisitos para el mecanismo TPC están muy ligados a la máxima PIRE que se puede utilizar. Sin embargo, las recomendaciones de la ITU para la limitación de la interferencia entre sistemas satelitales y redes inalámbricas de banda ancha van más allá, en concreto para la banda 5470-5570 MHz [62].

La ITU define que la potencia máxima y la PIRE máxima que puede utilizar en un transmisor debe

Densidad espectral de PIRE	Ángulo de elevación
13 dB(W/MHz)	para $0^\circ \leq \theta < 8^\circ$
$13 - 0,716(\theta - 8)$ dB(W/MHz)	para $8^\circ \leq \theta < 40^\circ$
$35,9 - 1,22(\theta - 40)$ dB(W/MHz)	para $40^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
42 dB(W/MHz)	para $\theta > 45^\circ$

Cuadro 8.4: Densidad Espectral de PIRE en función del ángulo de elevación.

Banda de Frecuencia	PIRE Máxima	Densidad máxima de PIRE a mínima potencia	Densidad máxima de PIRE a máxima potencia
5150-5350 MHz	23 dBm	11 dBm/MHz	17 dBm/MHz
5470-5725 MHz	30 dBm	18 dBm/MHz	24 dBm/MHz

Cuadro 8.5: Limitaciones de la CEPT para la operación en las bandas 5150-5350 y 5470-5725 MHz.

ser la menor de las dos opciones que se muestran en el Cuadro 8.3. Por último, no sólo se hace referencia a la potencia o PIRE máxima, si no que hace hincapié en la acotación de la densidad máxima de PIRE, es decir, como se acomodará esa PIRE en el ancho de banda en el que el dispositivo transmita la señal. En este caso define dos: por un lado una más genérica de 17 dBm/MHz por transmisor, y por otro una específica para las estaciones base en función del ángulo de elevación  $\theta$  por encima del plano del horizonte local (de la Tierra). Los valores que puede tomar se muestra en el Cuadro 8.4,

En Europa la máxima PIRE y la densidad espectral máxima de PIRE son distintas en función de la banda de frecuencias utilizada [56]. Los valores que puede tomar cada una de ellas se muestran en el Cuadro 8.5.

Al igual que en el caso europeo, la FCC limita la potencia máxima de transmisión en función de la banda en la que operan, pero en esta caso con una granularidad aún mayor [57]. Los valores que pueden tomar los distintos parámetros se muestran en el Cuadro 8.6.

En los todos los casos, si se usan antenas de ganancia superior a 6 dBi, tanto la potencia máxima como el pico de la densidad espectral de potencia, se deben reducir en tantos dBm, como la ganancia de la antena supere 6 dBi. Sin embargo en el caso de enlaces fijos punto a punto en la banda de 5.725–5.825 GHz se pueden utilizar antenas de hasta 23 dBi, sin tener que realizar ningún ajuste en la potencia transmitida, pero si sobre pasa este valor, si habrá que aplicar una reducción proporcional.

Banda de Frecuencia (MHz)	Potencia Máxima de Tx Opción 1 (dBm)	Potencia Máxima de Tx Opción 2 (dBm)	Pico máximo de la densidad espectral (dBm/MHz)
5150-5250	17	$4 + 10 \log B^*$	4
5250-5350	24	$11 + 10 \log B^*$	11
5470-5725	24	$11 + 10 \log B^*$	11
5725-5850	30	$17 + 10 \log B^*$	17

Cuadro 8.6: Limitaciones de la FCC para la operación en las bandas de 5 a 6 GHz.

\*B es el ancho de banda en MHz del punto de la máscara de transmisión donde la emisión de reduce en 26 dB.

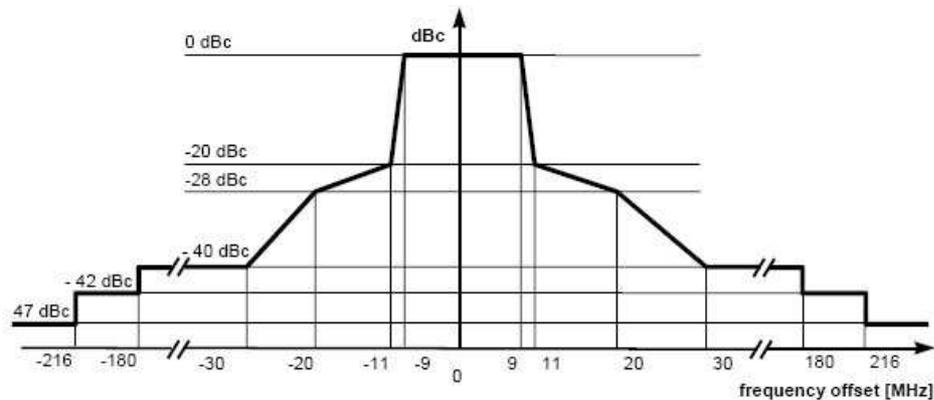


Figura 8.2: Máscara de transmisión europea en la banda de 5GHz para un canal de 20 MHz.

### 8.3.1. Máscara de transmisión

En el apartado anterior, al describir los límites de potencia definidos en la FCC, se ha hecho referencia a la máscara de transmisión, en concreto al punto donde la emisión se reduce en 26 dBm. La definición que la FCC presenta en sus documentos, de nuevo vuelve a ser distinta en función de la banda de operación [57].

Mientras que en las bandas 5.15-5.25 GHz, 5.25-5.35 GHz y 5.47-5.725 GHz, todas las emisiones fuera de la banda han de ir con un factor de reducción de -27dbm/Mhz; para la banda de 5.725-5.825 GHz, todas las transmisiones en un rango de 10 MHz por encima o por debajo de la banda han de ser atenuadas en -17dBm/MHz, y de -27dbm/MHz para frecuencias en rangos mayores.

Pese a que en la limitación de la potencia transmitida, el marco regulatorio europeo no mencionaba dicha máscara, ésta también ha sido definida para así reducir interferencias en otros frecuencias adyacentes [56]. En este caso, la máscara es la misma para todas las bandas y viene representada por la Figura 8.2



## 9 Viabilidad técnica de operación en bandas libres de redes WiMAX multisalto

Una vez descritos los mecanismos que definen los reguladores internacionales para la operación de redes inalámbricas en la banda de frecuencias de 5 a 6 GHz, en este capítulo se pretende comprobar como se pueden implementar éstos en la arquitectura de retransmisión descrita a lo largo del capítulo 7. Para ello, en primer lugar, se describirá como el estándar 802.16-2009 contempla la inclusión de dichos mecanismos, para posteriormente argumentar como se podrían incluir estos en 16j.

### 9.1. Mecanismos definidos en 802.16-2009 para adaptarse a la legislación en bandas libres

El estándar 802.16-2009 tiene definida la operación en la banda de 5 a 6 GHz a través de una de las capas PHY que define, en concreto la denominada WirelessHUMAN. En ella se indica que los equipos WiMAX que quieran operar en estas bandas tienen que utilizar protocolos de DFS siempre que lo requiere la regulación nacional. Además, tiene definidos mecanismos de control de potencia que aplican a todas las PHY y, de forma más explícita para la WirelessHUMAN, define la máscara de transmisión para no crear interferencias en los canales adyacentes. A continuación se describirá la implementación que contiene el estándar 802.16-2009 sobre estos mecanismos.

#### 9.1.1. Selección Dinámica de Frecuencias

La selección dinámica de frecuencia (DFS por sus siglas en inglés) está contemplada dentro del estándar 802.16-2009. En concreto, se indica que ésta se tiene que utilizar de acuerdo a la regulación internacional en aquellos escenarios donde se requiera compartir los recursos radioeléctricos con usuarios específicos identificados por dicha regulación. Los procedimientos que define para llevar a cabo DFS son los siguientes:

- Escaneo de canales para encontrar otros usuarios, en concreto, usuarios primarios.
- Detección otros usuarios, específicamente, usuarios primarios.
- Planificación del escaneo de canales.
- Solicitud e información de medidas.
- Detención de la operación una vez detectados usuarios específicos, u otros usuarios, en la banda de operación.
- Selección y anuncio de un nuevo canal de operación.

Un sistema WiMAX que tenga implementado DFS no puede comenzar a operar en un canal que contenga otros usuarios o que no ha sido escaneado recientemente en búsqueda de usuarios específicos. Los temporizadores utilizados por la BS deben ser aquellos definidos en los marcos regulatorios y deben incluir:

- Ciclo de escaneo inicial vigente (Startup Test Valid (STV)). Intervalo durante el cual se testean los canales de trabajo antes de iniciar la operación de una red.
- Tiempo de escaneo inicial (Startup Test Period (STP)). Intervalo durante el cual se escanea un canal antes de comenzar a operar en él.
- Intervalo de escaneo en operación (Operating Test Period (OTP)). Tiempo efectivo de escaneo de un canal mientras se opera en él.
- Ciclo de escaneo en operación (Operacting Test Cycle (OTC)). Período durante el cual se escanean los canales en los que se opera.
- Intervalo máximo de operaciones de datos (Max Data Operations Period (MDOP)). Plazo que tiene una estación para enviar tramas de datos una vez que ha detectado a un usuario específico en su canal de operación.
- Intervalo de operaciones de gestión (Management Operation Period (MOP)). Plazo que tiene una estación para enviar tramas de gestión una vez que ha detectado a un usuario específico en su canal de operación.
- Plazo máximo para la conmutación a otros canal (Max Channel Switch Time (MCST)). Plazo que tiene una estación para cambiar de canal una vez que ha detectado un usuario específico en su canal de operación.

Con éstos temporizadores el estándar define que:

- Un sistema WiMAX tiene que escanear un canal si éste no ha sido escaneado al menos durante STP en el último STV.
- Un sistema WiMAX tiene que escanear un canal durante STP si durante STV se detectaron usuarios operando en dicho canal.
- Un sistema WiMAX tiene que escanear un canal en el que está operando durante al menos OTP dentro de OTC.

El escaneo de canales es gestionado por la BS, que puede decidir llevarlo a cabo ella misma o solici-társelo a una o más SS. Para hacerlo la BS debe incluir un Channel Measurement IE dirigido a las SS que vayan a realizar las medidas para indicarlas el intervalo para llevarlas a cabo.

Como todas las transmisiones que realiza una BS se realizan en modo Broadcast, ésta no puede transmitir nada durante el período indicado en el IE. Además, si se trata de medir el canal de operación, tampoco lo podrán hacer el resto de estaciones de la red. La SS debe comenzar medir el canal indicado dentro del intervalo especificado antes de que se cumpla el MCST. Esa medición se puede extender hasta un MCST antes del comienzo de la siguiente trama o de la próxima transmisión programada en el UL

Por cada canal medido la SS tiene que tomar nota de:

- Número de trama en que fue realizada la primera medida.
- Tiempo de medida acumulado.
- Existencia de usuarios primarios.
- Existencia de usuarios haciendo uso de la PHY WirelessHUMAN.

- Otras transmisiones desconocidas, tales como redes de radios de área local (RLAN).

En cualquier momento la BS le puede solicitar dicho informe mediante un mensaje Channel Measurement REP-REQ. Lo normal es que esto se realice una vez que la BS ha asignado intervalos suficientes a la SS para que el periodo de medida cumpla con el marco regulatorio. Si recibe dicho mensaje, la SS ha de responder con un mensaje Channel Measurement REP-RSP que contenga las medidas tomadas, que deberá resetear a continuación.

Si una BS o una SS detecta un usuario específico en el canal de operación de la red, debe detener la transmisión de:

- MAC PDUs que contengan datos antes de que se cumpla el MDOP.
- MAC PDUs que contengan información de gestión antes de que se cumpla el MOP.

Además, debe enviar un mensaje Channel Measurement REP-RSP en la primera oportunidad que tenga de forma que pueda informar a la BS. La BS debe proporcionar intervalos suficientes a las SS para que puedan enviar estos mensajes autonomamente para poder cumplir con el marco regulatorio.

El uso de un mecanismos para la detección de estos usuarios específicos es obligatorio, pero se deja su definición a los fabricantes.

Ya sea por la detección de un usuario específico o para cumplir con el uso uniforme de todos los canales dentro de una banda de frecuencia, una BS puede decidir mover la operación de la red a otro canal cuando estime oportuno. Para ello, la BS debe anunciar el nuevo canal a todas sus SS asociadas dentro del campo Channel Nr del mensaje DCD. Las estaciones cliente deben comenzar a utilizar este canal a partir de la trama indicada en el campo Channel Switch Frame Number del mensaje DCD. Además, la BS no puede planificar transmisiones que vayan a tener lugar durante un MSCT antes de que el cambio de canal tenga lugar.

Por lo tanto, la definición del mecanismo DFS que se hace en el estándar 802.16-2009 es muy similar a la requerida por los organismos regulatorios internacionales.

La comparación entre la definición de DFS que se presenta en el estándar 802.16-2009 y la requerida por los organismos regulatorios internacionales se hace complicada debido a que no utilizan la misma nomenclatura. Sin embargo, si se presta atención a las definiciones, existen muchas similitudes entre los parámetros definidos por ambos. En el Cuadro 9.1 se muestra una equivalencia entre los nombres utilizados por ambos para referirse al mismo parámetro. En este se puede ver como la implementación real del algoritmo requiere que para el parámetro Channel Closing Transmission Time el estándar requiere diferenciar entre el tráfico de datos y el tráfico de control. Además, Para facilitar la implementación del algoritmo de DFS, WiMAX define dos parámetros adicionales el Startup Test Valid y el Operating Test Cycle, que tratan de acotar dentro de un intervalo determinado los escaneos que se tienen que llevar a cabo antes y durante operación en un canal.

Si bien es cierto que el estándar no define el Interference Detection Threshold o el Non-Occupancy Period, se refiere a ellos cuando dice que los intervalos y los umbrales utilizados son aquellos que define la regulación. Además, pese a que en el estándar no se incluyen valores para ninguno de los parámetros definidos, indica en varias ocasiones que los valores a utilizar son aquellos que establecen los marcos regulatorios internacionales mostrados en el capítulo 8.

Por lo tanto, se puede considerar que el estándar 802.16-2009 incluye los mecanismos y mensajes necesarios para cumplir con el requisito de implementar un algoritmo de Selección Dinámica de Frecuencias que permita no causar interferencias dañinas en los usuarios específicos de la banda de 5 a 6 GHz. Además, permite ampliar su funcionalidad ya que permite detectar no sólo radares, si no otras comunicaciones, tales como las satelitales, lo que permitiría evitar posibles interferencias con estas redes. Ahora bien, la implementación de dicho algoritmo no está definida, y tiene que ser llevada a cabo por los fabricantes de los equipos.

Nomenclatura DFS Organismos Internacionales	Nomenclatura DFS Estándar 802.16-2009
Channel Availability Check Time	Startup Test Period
Channel Move Time	Max Channel Switch Time
Channel Closing Transmission Time	Max Data Operations Period Management Operation Period
In-Service Monitoring	Operating Test Period

Cuadro 9.1: Distintas nomenclaturas para la selección dinámica de frecuencias.

### 9.1.2. Control de Potencia Transmitida

Como se ha descrito en la sección 7.5.4, el estándar contempla un algoritmo centralizado en el que la BS coordina la potencia que pueden transmitir las SS para que cumplan con el marco regulatorio existente. Además, las SS son las encargadas de mantener la densidad espectral de potencia transmitida uniforme, independientemente del tamaño de las asignaciones que reciban.

Además de contemplar un mecanismo de control de potencia, tal y como requieren los organismos regulatorios, las especificaciones de éste cumplen con creces lo exigido en la legislación. En concreto, el CEPT y la FCC piden que los equipos que operen en estas frecuencias pueden operar hasta 6 dBs por debajo de su PIRE máxima. El mecanismo de control de potencia de WiMAX establece que cada transmisor tiene que contar con un controlador escalonado del nivel de potencia transmitida con un mínimo de 30 dBm. Por lo tanto, WiMAX supera con creces el requisito de 6 dB establecido por los organismos internacionales.

### 9.1.3. Límites en la potencia máxima radiada

En el estándar no se da ninguna especificación sobre el límite de potencia máximo a emitir más que la obligación de cumplimiento de los marcos regulatorios internacionales. Por lo tanto, se da por supuesto que los distintos fabricantes diseñarán equipos que cumplan estas características. Sin embargo, en el estándar sí que está definida la máscara de transmisión para equipos WiMAX, y se diferencia en función de la canalización elegida dentro de las dos posibles, 10 y 20 MHz [22]. La máscara definida se muestra en la Figura 9.1, que si se compara con la definida para un canal de 20 MHz por el CEPT (Figura 8.2), se observa como ésta es aún más estricta. En concreto para 0,9 MHz fuera de banda, WiMAX requiere que se haya producido una caída de 32 dB, mientras que el CEPT, para 1 MHz solicita 28 dB.

## 9.2. Viabilidad de implementar estos mecanismos en redes multisalto

Una vez conocidos los mecanismos que están definidos en el estándar 802.16-2009 para permitir la operación en bandas libres, en este apartado veremos cómo se pueden adaptar éstos a la operación en redes multisalto.

### 9.2.1. Selección Dinámica de Frecuencias

La definición del mecanismo de DFS en el estándar 802.16-2009 se basa en un algoritmo centralizado en la BS a partir del cual se realiza mediciones de los distintos canales en los que podría operar la red

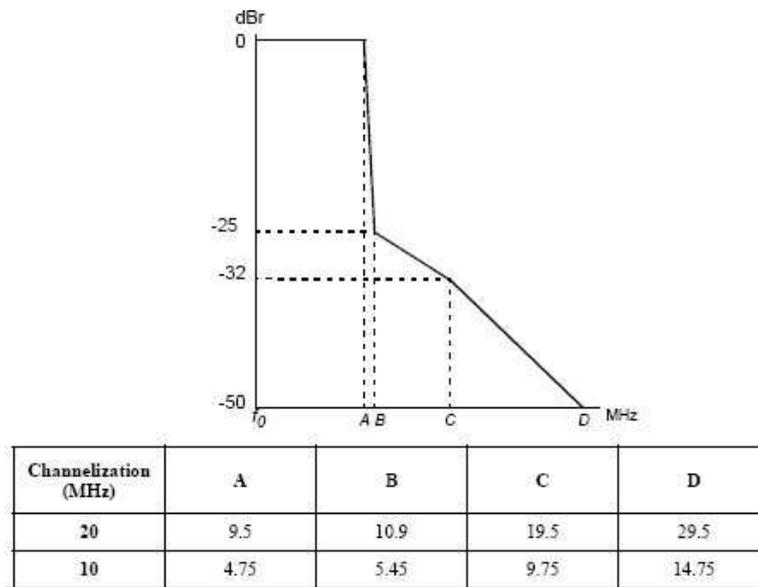


Figura 9.1: Máscara de transmisión definida en WiMAX para la banda de 5GHz.

para detectar usuarios específicos en ellas. Parte de estas mediciones pueden ser llevadas a cabo por las SS si la BS se lo indica mediante un Channel Measurement REP-REQ, a lo que la SS le contesta con un Channel Measurement REP-REQ. Como se describió en los apartados 7.5.4 y 7.5.7.2, el uso de estos mensajes está definido para que se realicen algunos mecanismos en redes multisalto, por lo que se podría reutilizar para llevar a cabo los algoritmos de DFS. Lo que si necesitaría añadirse en las RS es la posibilidad de interpretar los Channel Measurement IE utilizados para señalar los recursos que asigna la BS para llevar a cabo las medidas de señales en otros canales.

Si las RS implementaran tanto los mensajes, como el IE utilizados para realizar DFS, únicamente tendrían que contar con una interfaz radio capaz de escanear las señales de otros usuarios para implementar DFS de forma efectiva. Dado que existen mecanismos definidos en la enmienda en los que las RS miden la señal que reciben de otras RS, parece que también podrían hacerlo para detectar otro tipo de señales.

Dado que con las redes multisalto el área de cobertura de un única red es mayor, y con ella crece la posibilidad de interferir con un usuario primario, el algoritmo de DFS que se implemente para las redes multisalto tendrá que tener en cuenta este hecho. En este escenario, una de las opciones que se debería considerar es la de realizar escaneos por cada celda cubierta por una RS con la misma periodicidad que se realizaban para la celda que cubre una BS en 802.16-2009. Lo que habría que estudiar en ese caso es si la red sería capaz de detener todas sus transmisiones y migrar la red a otro canal dentro del tiempo máximo permitido y el límite máximo de datos establecido para cumplir con los requisitos de las instituciones regulatorias. Aunque lo más probable también es que si la interferencia se produce, únicamente sea en una zona de la red, por lo que el tráfico interferente será menor. Este algoritmo también tendrá que tener en cuenta que la red completa puede estar trabajando en distintas frecuencias al mismo tiempo, por lo que tendrá que controlar en todo momento, cuales son los canales disponibles y con usuarios primarios en cada celda.

En caso de tener que migrar la red, la MR-BS haría uso, al igual que en el caso PtMP, del campo Channel Switch Frame Number del mensaje DCD, que las RS tiene que implementar de todas formas.

### **9.2.2. Control de Potencia de Transmisión**

Como se ha podido comprobar en el apartado 7.5.4, las redes multisalto, tal y como están definidas en la enmienda 802.16j, contemplan el uso de un control del nivel de potencia transmitida. Como se ha indicado en 9.1.2, este control cumple con creces con los requisitos definidos por la organismos regulatorios internacionales.

### **9.2.3. Límites en la potencia máxima radiada**

Como ya se ha indicado en varias secciones del documento, los mecanismos descritos para permitir redes multisalto WiMAX se encuentran en una enmienda al estándar 802.16-2009. Es decir, que si fructifica, el contenido de la enmienda será incluido donde corresponda en la siguiente revisión del estándar. Es decir, que los mecanismos físicos descritos para la operación de WiMAX en bandas libres, como es el caso de los límites en la potencia máxima radiada descrito en el apartado 9.1.3, serían válidos si se permitiera que las redes multisalto operaran en estas bandas.

## **9.3. Conclusión**

Los mecanismos definidos por WiMAX para que sus redes puedan operar en la banda no licenciada de 5GHz cumplen con los requisitos definidos por los órganos regulatorios internacionales. Dos de los tres requisitos, el nivel de control de potencia transmitida y los límites en la potencia máxima radiada, podrían ser cumplidos por las estaciones de las redes multisalto sin realizar ninguna modificación a la enmienda actual. Lo que sí se tendría que incluir es un algoritmo de DFS para redes multisalto que tenga en cuenta las peculiaridades de éstas, tal y como están definidas en la enmienda IEEE 802.16j. Además, este algoritmo permitiría, al igual que a las redes WiMAX actuales, a las redes 16j utilizar las frecuencias centrales que estén menos congestionadas.

## 10 Especificaciones de diseño de cada modo de operación

Como se ha comprobado, la enmienda 802.16j ofrece una gran versatilidad en cuanto a las posibilidades de operación que describe. Fundamentalmente, define tres modos de operación: transparente, no transparente con planificación centralizada y no transparente con planificación distribuida. Es cierto que existen otras opciones de operación, pero todas ellas son una extensión de las tres citadas, pudiendo suponer que en el mercado podrían existir tres tipos de estaciones retransmisoras: RS Transparente (RS-T), RS no transparente con planificación centralizada (RS-NTc) y RS no transparente con planificación distribuida (RS-NTd). Sin embargo, la operación en modo Retransmisión Multisalto (MR) no sería posible si no se implementan cambios en las BS actuales, para que puedan proporcionar toda la funcionalidad requerida en las MR-BS.

En este apartado se distinguen de manera detallada cuáles son los mensajes a intercambiar, y, por ende, los nuevos mecanismos a diseñar para que los cuatro tipos de estación indicados, MR-BS, RS-T, RS-NTc y RS-NTd, puedan proporcionar la funcionalidad descrita en la enmienda 802.16j. De esta forma, además, se podrá analizar la complejidad que conlleva la implementación de cada modo de operación. Las modificaciones o inclusiones a implementar serán listadas de forma sencilla, siendo necesaria la lectura y comprensión del capítulo 7 para entender correctamente sus implicaciones. En concreto cada apartado de esta sección se corresponde con los capítulos de dicho anexo. Así, para información puntual, se recomienda leer la sección 7.1 para el apartado 10.1, la sección 7.2 para el apartado 10.2, la sección 7.3 para el apartado 10.3, la sección 7.4 para el apartado 10.4 y la sección 7.5 para el apartado 10.5.

Delante de alguna de las instrucciones aparecen códigos que indican para qué opción se requiere dicha instrucción. Si no aparece nada, se entiende que es obligatoria y válida para todos los modos de operación. Los códigos utilizados son:

- Opcional. Indica que dicha instrucción es opcional.
- Local CID. Indica que dicha instrucción sólo aplica al modo de operación de asignación local de CID.
- RS-T. Indica que la instrucción sólo aplica cuando involucra a RS Transparentes.
- RS-NT. Indica que la instrucción sólo aplica cuando involucra a RS No Transparentes.
- RS-NTc. Indica que la instrucción sólo aplica cuando involucra a RS No Transparentes operando en modo centralizado.
- RS-NTd. Indica que la instrucción sólo aplica cuando involucra a RS No Transparentes operando en modo distribuido.
- SegD. Indica que la instrucción sólo aplica cuando involucra a RS No Transparentes operando en modo distribuido y seguridad distribuida.

## 10.1. Inicialización

### 10.1.1. MR-BS

La MR-BS tiene el papel principal en el proceso de inicialización de estaciones en la red, ya que por ella han de pasar todos los mensajes que se intercambian los nodos al inicializarse en la red. Para su implementación sería necesario que se realizarán las siguientes modificaciones a las BS actuales:

- (Opcional) Incluir el parámetro end-to-end metric con valor 0 en el DCD para que las RS que se inicializan sepan que se trata de la MR-BS.
- Incluir el parámetro RS\_Initial\_CDMA\_Code en el UCD para que las RS lo utilicen al inicializarse.
- (RS-T) Interpretar el mensaje MR\_RNG-REP que le puede enviar una RS-T con los códigos CDMA de inicialización que recibe, y comparar los valores incluidos en éste con los que ella misma recibe para indicarle a la SS con quién inicializarse.
  - Si elige a la RS-T, le tiene que indicar mediante un UL\_Receive\_Burts IE que en lugar recibe el RNG-REQ y proporcionarle recursos para que ésta se lo retransmita.
- Si la que se inicializa es una RS, en el RNG-RSP le tiene que enviar los códigos CDMA dedicados para cada uno de sus procesos.
- Decidir las etapas de la inicialización que ha de llevar a cabo la RS que se inicializa e incluirlas en el RNG-RSP.
- Asignar los CID básico y primario en el RNG-RSP a las RS de las que reciba un RNG-REQ, ya sea recibido directamente o reenviado.
- Interpretar las nuevas capacidades básicas de las RS que puede recibir de éstas en los SBC-REQ.
- Interpretar las nuevas características de operación que las RS pueden incluir en los mensajes de registro (REG-REQ).
- (Opcional) Si una RS tiene que medir la potencia de sus vecinos para seleccionar a la RS con la que engancharse a la red, la MR-BS tiene que gestionar los procesos de medición de vecinos e interpretar el mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP con el resultado de éstos para, si lo considera oportuno, enviarle a la RS un RS\_Access-REQ en el que le indica el preámbulo de la estación con la que se debe enganchar a la red. En esta decisión puede no sólo influir la potencia, si no la carga de tráfico de cada camino.
- (Opcional - RS-NT) Aprovisionar túneles de tráfico o gestión mediante un DSA-REQ a las RS de acceso que se inicializan.
- (Opcional - RS-NT) Mapear los túneles aprovisionados a un camino y notificar a las RS existentes mediante un DSA-REQ los caminos para llegar a la nueva RS.
- Configurar a las estaciones mediante el RS\_Config-CMD, sabiendo, gracias al SBC-REQ y REG-REQ, que modos y características de operación soportan.
  - (Opcional - Local CID) Enviar los CID que utilizará un RS-NTd con asignación local de CID a sus estaciones subordinadas en el RS\_Config-CMD.

- (Opcional - RS-NTd) Si recibe una cabecera MR\_Code-Rep de una RS-NTd solicitando la admisión de un nuevo nodo en la red, la MR-BS contesta con un RNG-RSP con la respuesta.
- (Opcional - RS-NTc) Tiene que proporcionar los recursos para que una RS-NTc realice la alineación inicial con una estación subordinada. Esto consiste en incluir un BW\_Alloc IE dentro del RS\_Access-MAP para que la RS-NTc pueda enviar sus RNG-RSP con los ajustes a la estación inicializándose. Cuando los ajustes han terminado la MR-BS recibirá un MR\_Code-Rep para solicitar recursos para que la SS pueda enviar su RNG-REQ.
  - Si la MR-BS lo acepta, envía un CDMA\_Allocation IE para que la RS-NTc lo rellene y la SS pueda enviar su mensaje.
  - Si la MR-BS lo rechaza le envía un mensaje RNG-RSP e incluye un BW\_Alloc IE dentro del RS\_Access-MAP para que la RS-NTc pueda enviar el RNG-RSP a la SS.

### 10.1.2. RS-NTd

Cuando una RS-NTd está inicializándose, sigue procedimientos muy similares a los seguidos por las SS. Sin embargo, existen algunos mecanismos distintos que tiene que implementar:

- (Opcional) Interpretar el campo end-to-end metric del DCD para seleccionar con qué estación va a realizar su entrada en la red.
- Interpretar el campo RS\_Initial\_CDMA\_Code dentro del UCD y utilizar los códigos que contiene para que la estación superordinada sepa que se trata de una RS inicializándose.
- Utilizar los códigos de alineamiento específico que recibe de su estación superordinada en el RNG-RSP y realizar las etapas de inicialización indicadas en este mensaje.
- Enviar un SBC-REQ a la MR-BS indicando sus capacidades básicas (incluye nuevas capacidades).
- Enviar un REG-REQ a la MR-BS indicándole sus características de operación (incluye nuevas características).
- (Opcional) Medir la potencia que recibe de cada vecino y enviar los resultados obtenidos dentro del mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP.
- (Opcional) Ante la llegada de un DSA-REQ indicando la creación de caminos o de túneles, tiene que confirmar su llegada con un DSA-RSP y poner en marcha su contenido.
- Interpretar el contenido del RS\_Config-CMD y enviar un MR\_Generic-ACK confirmando su recepción.
  - (Opcional - Local CID) Una RS-NTd operando con asignación local de CID recibe en este mensaje los CID que podrá proporcionar a sus subordinadas.

Un vez operativa tendrá que realizar las siguientes tareas:

- (Opcional) Incluir el parámetro end-to-end metric con valor x (número de saltos a la MR-BS) en el DCD para que las RS que se inicializan sepan que se trata de una RS intermedia.
- Incluir el parámetro RS\_Initial\_CDMA\_Code en el UCD para que las RS que se inicialicen con ella lo utilicen.

- Ser capaz de interpretar los códigos CDMA que recibe, realizar el alineamiento inicial con aquel que se los envía y componer un RNG-RSP con los ajustes en caso necesario.
- (RS-T) Interpretar el mensaje MR\_RNG-REP que le puede enviar una RS-T con los códigos CDMA de inicialización que recibe, y comparar los valores incluidos en éste con los que ella misma recibe para indicarle a la SS con quién inicializarse.
  - Si elige a la RS-T, le tiene que proporcionar recursos para que ésta le retransmita el RNG-REQ de la SS.
- (Opcional) La RS-NTd puede consultar a la MR-BS si acepta la entrada de la SS en la red. Para ello le envía una cabecera MR\_Code-Rep, y espera la llegada de un RNG-RSP en caso positivo.
- Una vez finalizado el alineamiento inicial, le envía un RNG-RSP a la estación subordinada indicándole, para que ésta le pueda enviar un RNG-REQ con su MAC.
  - (Opcional - Local CID) Si la RS-NTd opera con asignación local de CID, le contesta a la estación subordinada con los CID de sus conexiones
  - Si la RS-NTd opera con asignación normal de CID, le reenvía el mensaje a la MR-BS para que ésta componga el RNG-RSP con los CID.
- Retransmitir los mensajes SBC-REQ que reciba de estaciones subordinadas.
  - (Opcional - Local CID) Si se trata de una RS-NTd operando en modo de asignación local de CID, al retransmitir el SBC-REQ, le tiene que decir a la MR-BS qué CID le ha dado a la SS y la MAC de ésta.
- Retransmitir todos los mensajes REG-REQ de sus estaciones subordinadas.
  - (Opcional - Local CID - SegD) Si se trata de una RS-NTd operando en modo de asignación local de CID y seguridad distribuida, al recibir un REG-REQ, puede estudiar si la estación está autorizada o no, y si no lo está, no escalar el mensaje a la MR-BS.

### **10.1.3. RS-NTc**

Cuando una RS-NTc está inicializándose sigue procedimientos muy similares a los seguidos por las SS. Sin embargo, existen algunos mecanismos específicos de las RS que tiene que implementar:

- (Opcional) Interpretar el campo end-to-end metric del DCD para seleccionar con que estación va a realizar su entrada en la red.
- Interpretar el campo RS\_Initial\_CDMA\_Code dentro del UCD y utilizarlos para que la estación superordinada sepa que se trata de una RS.
- Utilizar los códigos de alineamiento específico que recibe de su estación superordinada en el RNG-RSP y realizar las etapas de inicialización indicadas en este mensaje.
- Enviar un SBC-REQ a la MR-BS indicando sus capacidades básicas (incluye nuevas capacidades).
- Enviar un REG-REQ a la MR-BS indicándole sus características de operación (incluye nuevas características).
- (Opcional) Medir la potencia que recibe de cada vecino y enviar un mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP.

- (Opcional) Recibir y procesar los mensajes RS\_Access-REQ, y envío de MR\_Generic ACK.
- (Opcional) Ante la llegada de un DSA-REQ indicando la creación de caminos o de túneles, tiene que confirmar su llegada con un DSA-RSP y poner en marcha su contenido.
- Interpretar el contenido del RS\_Config-CMD y enviar un MR\_Generic-ACK confirmando su recepción.

Un vez operativa tendrá que realizar las siguientes tareas:

- (Opcional) Incluir el parámetro end-to-end metric con valor x (número de saltos a la MR-BS) en el DCD para que las RS que se inicializan sepan que se trata de una RS intermedia.
- Incluir el parámetro RS\_Initial\_CDMA\_Code en el UCD para que lo utilicen las RS que se inicializan.
- (RS-T) Interpretar el mensaje MR\_RNG-REP que le puede enviar una RS-T con los códigos CDMA de inicialización que recibe, y comparar los valores incluidos en éste con los que ella misma recibe, para indicarle a la SS con quién inicializarse. Para ello ha tenido que solicitar previamente recursos a la MR-BS mediante códigos CDMA o una cabecera RS BR para que la RS-T pueda enviarle el mensaje.
  - Si elige a la RS-T, una vez que los ajustes terminen, le tiene que solicitar a la MR-BS recursos mediante códigos CDMA o una cabecera RS BR para que ésta le retransmita el RNG-REQ de la SS.
  - Si no, una vez que los ajustes terminen, le tiene que solicitar a la MR-BS recursos mediante MR\_Code-REP para que la MR-BS decida sobre la entrada de la SS en la red.
    - Si la MR-BS acepta, la RS recibirá un CDMA\_Allocation IE vacío que tendrá que rellenar con los datos de los códigos utilizados por la SS, para que en esa asignación le transmita el RNG-REQ.
    - Si rechaza, la RS recibirá un RNG-RSP con valor abort y una BW\_Alloc IE en el RS\_Access-MAP con aquella porción del DL-MAP donde poder transmitir dicho mensaje a la SS.
- Ser capaz de interpretar los códigos CDMA que recibe y realizar el alineamiento inicial con aquel que se los envía. El proceso es muy similar al descrito para las RS-T.
- Retransmitir los mensajes SBC-REQ que reciba de estaciones subordinadas.
- Retransmitir todos los mensajes REG-REQ de sus estaciones subordinadas.

#### 10.1.4. RS-T

Cuando una RS-T está inicializándose sigue procedimientos muy similares a los seguidos por las SS. Sin embargo, además, tiene que implementar los siguientes mecanismos:

- Interpretar el campo end-to-end metric del DCD para seleccionar con que estación va a realizar su entrada en la red.
- Interpretar el campo RS\_Initial\_CDMA\_Code dentro del UCD y utilizarlos para que la estación superordinada sepa que se trata de una RS.

- Utilizar los códigos de alineamiento específico que recibe de su estación superordinada en el RNG-RSP y realizar las etapas de inicialización indicadas en este mensaje.
- Enviar un SBC-REQ a la MR-BS indicando sus capacidades básicas (incluye nuevas capacidades).
- Enviar un REG-REQ a la MR-BS indicándole sus características de operación (incluye nuevas características).
- (Opcional) Medir la potencia que recibe de cada vecino y enviar un mensaje RS\_NBR\_MEAS-REP a la MR-BS.
- (Opcional) Recibir y procesar los mensajes RS\_Acces-REQ, y envío de MR\_Generic ACK.
- Interpretar el contenido del RS\_Config-CMD y enviar un MR\_Generic-ACK confirmando su recepción.

Cuando está operativa:

- Si recibe códigos CDMA de alineamiento, tiene que solicitar recursos en el UL a su estación superordinada mediante códigos CDMA propios para poder enviarle un MR\_RNG-REP con su valoración sobre los códigos recibidos.
  - Si la estación superordinada la elige a ella, cuando acaben los ajustes, recibirá una asignación en forma de UL\_Burst\_Receive IE para indicarle dónde recibir el RNG-REQ de la SS.

## **10.2. Solicitudes y Asignaciones**

### **10.2.1. MR-BS**

Las modificaciones requeridas en las BS actuales para que soporten los mecanismos de solicitudes y asignaciones definidos para la enmienda 16j son diferentes en función de la naturaleza de la RS. A continuación se describirán aquellos necesarios para cada tipo.

Para operar con RS-NTd las MR-BS tendrán que contemplar las siguientes tareas:

- Traducir las solicitudes de piggybacking que reciban de las RS-NTd con seguridad centralizada, y enviarles la traducción de vuelta en un MR\_PBBR-INFO.
  - (Opcional) Solicitar a la SS en el Request/Transmission Policy que deje de enviar este tipo de solicitudes.
- Interpretar la cabecera Tunnel BR y actuar en consecuencia.

A continuación se indican las tareas que la MR-BS tendrá que llevar a cabo para operar con RS-NTc:

- Interpretar las distintas solicitudes que le pueden llegar en forma de cabecera RS BR, de códigos CDMA (cada uno tiene un propósito específico) o MR\_Code-REP y actuar en consecuencia.
- Realizar los sondeos de forma secuencial a todas las RS a lo largo del camino para que las respuestas lleguen a la MR-BS dentro del menor intervalo posible.
- Planificar perfectamente a las RS-NTc, tanto para el reenvío de los datos de SS, como para la transmisión de mensajes de control que tengan que transmitir:

- Enviar estas planificaciones dentro de los mensajes RS\_Relay-MAP para las RS intermedias y RS\_Access-MAP para las RS de acceso.
- Realizar las asignaciones para una RS de forma simultánea para todas las RS en el camino hasta ella.
- Tener en cuenta el tiempo mínimo que cada estación intermedia requiere para retransmitir cada paquete, así como la estructura multisalto.

Si la MR-BS quiere operar con RS-T tendrá que implementar los siguientes mecanismos:

- Interpretar las solicitudes que le puede llegar en forma de cabecera RS BR o de códigos CDMA (cada uno tiene un propósito específico).
- Interpretar el MR\_RNG-REP con los valores de los códigos CDMA, y el bit que indica si a la RS-T le faltan datos por enviar.
- Asignar los recursos necesarios en recepción y en transmisión para que la RS funcione correctamente.

### 10.2.2. RS-NTd

Las RS-NTd tienen que llevar a cabo las siguientes tareas para gestionar las solicitudes de sus subordinadas:

- Manejar de forma autónoma las solicitudes que reciben de sus estaciones subordinadas: cabecera de BR, solicitudes de piggybacking en los paquetes de datos y códigos CDMA de solicitud.
  - Si opera en modo de seguridad centralizada, tendrá que enviar las solicitudes piggybacked a las MR-BS, e interpretar el MR\_PBBR-INFO que recibe de ésta.
  - (SegD) Si opera en modo de seguridad distribuida puede comprender estas solicitudes y actuar en consecuencia.

Las RS-NTd tendrán que solicitar recursos en el UL para retransmitir el tráfico de su celda hacia la MR-BS. Para ello tiene que implementar los siguientes mecanismos:

- Hacer uso de cabeceras BR o solicitudes CDMA para solicitar recursos.
- Hacer uso de cabeceras Tunnel BR para solicitar recursos para la transmisiones de paquetes pertenecientes a un túnel único.

Las RS-NTd tienen capacidad propia para asignar recursos en su celda, para ello los siguientes mecanismos tienen que ser implementados:

- Asignar recursos conforme a lo indicado en su planificador.
- (Opcional) Como las RS-NTd con seguridad centralizada pueden detectar la presencia de solicitudes piggybacking, pero no descifrarlas, mientras espera la traducción de la MR-BS puede asignar ciertos recursos a la SS para disminuir el retardo.
- (Opcional) Indicar a sus RS-NTd subordinadas cuándo le va a realizar asignaciones en el futuro mediante el RS-SCH, de forma que la subordinada pueda tener a tiempo los datos de su subordinada para enviarlos en dicha asignación. Este mensaje se puede utilizar tanto para asignaciones para la transmisión de datos, como para sondeos.

### **10.2.3. RS-NTc**

Las RS-NTc pueden recibir solicitudes de sus estaciones subordinadas para la solicitud de recursos. Para el manejo de éstas se deben implementar los siguientes mecanismos:

- Retransmitir a la MR-BS todas las solicitudes que recibe, ya sean cabeceras BR, códigos CDMA o solicitudes piggybacking, sin ninguna modificación para que ésta planifique los enlaces y cree el RS\_Relay-MAP y el RS\_Access-MAP.
- Para reenviarlas, si tiene recursos asignados que no está utilizando reenviará las solicitudes en ellos, si no, solicitará recursos mediante códigos CDMA.
- Cuando recibe uno o varios códigos CDMA, la RS tiene que componer una cabecera MR Code-REP y enviársela a la MR-BS.

También puede darse el caso, aunque de forma muy puntual, de que una RS-NTc tenga que transmitir mensajes creados por ella misma. Para solicitar recursos para su transmisión:

- Enviar o bien un código CDMA específico para tal propósito, o bien una RS BR header.

Para manejar las asignaciones la RS-NTc tiene que implementar los siguientes mecanismos:

- No realizar asignaciones de ningún tipo.
- Los Mapas que envía los compone a partir de la información que recibe de la MR-BS en el RS\_Relay-MAP si se trata de una RS intermedia o en el RS\_Access-MAP si se trata de una de acceso.

### **10.2.4. RS-T**

Los mecanismos a implementar para el manejo de solicitudes, propias o ajenas, en una RS-T son los siguientes:

- Si recibe uno o varios códigos CDMA tiene que reenviárselos a la MR-BS en los recursos que tenga disponibles dentro de un MR\_RNG-REP.
- Si no tiene recursos suficientes para enviar todos, le indica en este mensaje a la MR-BS cuántos datos le faltan por retransmitir para que le pueda asignar más recursos.
- Si tiene recursos asignados que no está utilizando reenviará las solicitudes en ellos, si no, solicitará recursos mediante códigos CDMA. Los códigos son únicos por RS y función, de forma que la MR-BS no tenga que pensar de quién proviene y cuánto necesita.

## **10.3. Provisión de QoS**

### **10.3.1. MR-BS**

El estándar define dos tipos de mecanismos de retransmisión: basada en túneles o basada en conexiones. Para cada uno de ellos, se tienen que implementar mecanismos distintos en la MR-BS. Éstos, a su vez, son distintos si hablamos de planificación centralizada o de planificación distribuida.

En el caso de túneles con planificación centralizada:

- Incluir en las Relay MAC PDU Allocation Subheaders para que las RS-NTc sepan mapear los datos de la Relay MAC PDU a las asignaciones de los DL-MAP incluidas en los RS\_Acces-MAP y RS\_Relay-MAP. Incluirá una para cada RS intermedia y tantas como CID distintos en la Relay MAC PDU para la RS de acceso.
- Notificar a las estaciones intermedias los parámetros de QoS de los nuevos túneles, y a la de acceso, a parte de éstos, los CID a mapear en cada túnel mediante DSA-REQ.

En planificación distribuida los mecanismos serían:

- Solicitar decisiones de admisión de control a todas las RS en el camino mediante un DSA-REQ, antes de la creación de cualquier túnel. En este mensaje se incluyen los CID que la RS de acceso tiene que mapear. Indicar a las RS en el campo Per-RS QoS cuál es el retardo máximo que pueden introducir en los paquetes de datos de esa conexión.
- Si la respuesta que reciban dentro de un DSA-RSP es positiva, establecer túneles de datos y mapearlos a caminos que faciliten el enrutado de los paquetes mediante un DSA-REQ.
- Enviar un mensaje DSA-ACK a las RS intermedias con los datos del túnel finalmente admitido.
- Poder mapear CID a túneles ya existentes, mediante los mecanismos indicados (utilizando DSC-REQ, en vez DSA-REQ). Los parámetros de QoS de túnel serán el agregado de los parámetros QoS de las conexiones que transporta. Por lo que la MR-BS tiene que ser capaz de calcularlo.
- Poder crear nuevos túneles mediante los mecanismos mencionados.
- Ser capaz de crear Relay MAC PDU y de introducir la QoS Subheader en el DL y de eliminarla en el UL cuando se utiliza el túnel único.
- Ser capaz de enviar mensajes de solicitud de reducción de parámetros de QoS y de eliminación de CID de un túnel mediante mensajes DSC-REQ y de eliminación de túneles mediante mensajes DSD-REQ.
- (Opcional - SegD) Si la estación subordinada tiene seguridad distribuida, tiene que saber que si la RS intermedia le reenvía un DSA-REQ de la SS puede incluir el Per-RS QoS que estime oportuno, y también los parámetros que aceptaría.

En el mecanismo de retransmisión basado en CID, la MR-BS sólo tendrá que implementar mecanismos nuevos para el caso de planificación centralizada, puesto que para distribuida los mecanismos de solicitud de control de admisión y de notificación de caminos es el mismo que para túneles. Como ya se ha indicado, la MR-BS se tiene que encargar de planificar todos los enlaces en el modo centralizado para mantener la QoS dentro de la red. Para eso hace uso de un planificador que el estándar no especifica, y crea los mensajes RS\_Access-MAP y RS\_Relay-MAP, para que las RS de acceso e intermedias, respectivamente, envíen las asignaciones a sus estaciones subordinadas para mantener la QoS en la red. En estos mensajes se pueden incluir dos modalidades de retransmisión basada en CID: CID-based forwarding y burst-based forwarding.

A continuación, se describen las tareas que se han de implementar en la MR-BS para soportar el CID-based forwarding:

- (RS-NTc) Incluir el DL fixed forwarding delay y el UL fixed forwarding delay en el RS\_Config-CMD y tener en cuenta sus valores en las planificaciones.

- (RS-NTc) Si no proporciona estos valores, tendrá que incluir el DL\_Allocation\_Reference IE en el RS\_Access-MAP y RS\_Relay-MAP, para que las RS sepan en qué asignaciones de los DL-MAPs que retransmiten tienen que retransmitir los datos de los CID a los que hace referencia este IE.
- (RS-T) Tiene que enviar el RS\_Member\_List\_Update y proporcionar recursos a éstas para que puedan retransmitir los datos de las CID que este mensaje contiene.

Para que funcione el burst-based forwarding la MR-BS:

- (RS-T) Tiene que ser capaz de enviar los DL\_Burst\_Transmit IE y UL\_Burst\_Receive IE de forma que coincidan las asignaciones con las retransmisiones de ráfaga que tienen que hacer las RS-T.

### 10.3.2. RS-NTd

Los mecanismos a implementar en una RS-NTd para permitir el funcionamiento mediante túneles son los siguientes:

- Ser capaz de tomar decisiones de control de admisión ante la llegada de una solicitud por parte de la MR-BS, y contestar con un DSA-RSP aceptando o rechazando.
- Mantener una tabla de enrutado para saber a qué subordinada enviar los paquetes de datos de una conexión y confirmar la recepción de los mismos.
- Manejar correctamente el Per-RS QoS y aplicarlo.
- Las RS intermedias tienen que interpretar la QoS Subheader, y hacer peticiones para las Relay MAC-PDU utilizando la Tunnel BR Header.
- Las RS de acceso tienen que ser capaces de crear la Relay MAC PDU y la QoS Subheader y de mapear los CID correspondientes a la misma
- Aceptar modificaciones de reducción mediante DSC-REQ y de eliminación de túneles mediante DSD-REQ.
- (Opcional - SegD) Interpretar los mensajes de establecimiento de conexión que se intercambian la MR-BS y las SS y responder en caso de tener algo en contra (PER-RS QoS, parámetros no soportados).
- Contar con un Planificador en el UL que le permita decidir qué paquetes enviar en cada asignación que recibe.

Para el funcionamiento mediante CID, las operaciones son similares a las de túneles, es decir:

- Tomar decisiones de control de admisión.
- Tomar decisiones para la planificación de su celda.
- Encargarse de tener recursos suficientes para transmitir en su UL.
- Contar con un Planificador en el UL que le permita decidir qué paquetes enviar en cada asignación que recibe.

### 10.3.3. RS-NTc

Para que se pueda utilizar la retransmisión con túneles mediante RS-NTc, éstas tienen que poder realizar las siguientes tareas:

- Ser capaz de crear la Relay MAC PDU y de mapear los CID correspondientes a la misma.
- Interpretar las indicaciones de la MR-BS sobre los túneles y sus requisitos para luego poder actuar en consecuencia (solicitudes, decisiones de planificación en el UL).
- Manejar la Allocation Subheader, y eliminar la correspondiente a ella en la retransmisión en túneles en el DL.
- Contar con un planificador en el UL que le permita decidir qué paquetes enviar en cada asignación que recibe.

Para la retransmisión basada en CID, las RS-NTc sólo pueden hacer uso del método CID-based y para ello tendrán que implementar los siguientes mecanismos:

- Recibir, interpretar y poner en práctica el DL Fixed forwarding delay y el UL fixed forwarding delay del RS\_Config-CMD.
- Interpretar el DL\_Allocation\_Reference. En ellos se le indica qué paquetes ya recibidos de un CID concreto tiene que retransmitir en cada asignación del DL que recibe en el RS\_Access-MAP para las RS de acceso o el RS\_Relay-MAP para las RS intermedias.
- Contar con un planificador en el UL que le permita decidir qué paquetes enviar en cada asignación que recibe.

### 10.3.4. RS-T

Las RS-T no pueden utilizar la retransmisión mediante túneles, únicamente la basada en CID. Para ello tienen que implementar los siguientes mecanismos:

- Contar con un planificador en el UL que le permita decidir qué paquetes enviar en cada asignación que recibe.

Además, para hacer uso del mecanismo de CID-based, deberá poder:

- (CID-based) Recibir en el RS\_Member\_List\_Update la lista actualizada de los CID de los que tiene que retransmitir sus paquetes. Ante su recepción envía un MR\_Generic-ACK o una MR Acknowledgement Header.

Para el mecanismo burst-based un RS-T debe:

- (burst-based) Interpretar las reglas de retransmisión en el DL que le envía la MR-BS dentro del DL\_Burst\_Transmit IE.
- (burst-based) Interpretar las reglas de recepción en el UL que le envía la MR-BS dentro del UL\_Burst\_Receive IE.

## 10.4. Soporte en capa PHY

### 10.4.1. MR-BS

El soporte a la capa física que propone el nuevo estándar implica que la MR-BS soporte la coexistencia de RS-T y RS-NT. El soporte para las primeras es relativamente sencillo, mientras que para las segundas se complica al definirse dos modelos: uno que puede recibir y transmitir simultáneamente (STR) y otro que no puede hacerlo (TTR). A continuación describiremos cada uno de ellos.

El soporte para el modo transparente se basa en:

- Transmitir su preámbulo al comienzo de la trama para que las RS-T se mantengan sincronizadas.
- Ser capaz de crear la estructura de la trama (DL-MAP, UL-MAP y R-MAP) y enviarla en la zona de acceso del DL, después del preámbulo y el FCH.
- Poder estar en reposo en la zona de retransmisión del DL, o en su defecto, realizar diversidad cooperativa.
- Escuchar a las SS en la zona de acceso del UL, incluida la zona de Ranging.
- Escuchar a las RS en la zona de retransmisión del UL. En ésta también tiene que estar atento a los mensajes que se envían en las zonas de Ranging.
- (Opcional) Ser capaz de crear una zona de retransmisión directa (sólo en la configuración de dos saltos y cuando se utilice end-to-end HARQ).
- Tener en cuenta el R-RTI, el R-TTI, el RTG y el TTG al hacer las asignaciones.

Para la operación en modo TTR la MR-BS tiene que:

- Estructurar la trama (zonas de acceso y de relay) en el RS\_Config-CMD, ya que la RS no puede recibir esta información en la zona de acceso del DL.
- Enviar el preámbulo, el FCH, el DL-MAP y el UL-MAP en la zona de acceso del DL, y a continuación los datos a las SS.
- Enviar el R-ámbulo, el R-FCH y el R-MAP en la zona de retransmisión del DL, y, a continuación, los datos a las RS.
- En el UL, recibir de las SS en la zona de acceso y de las RS en la zona de retransmisión, incluidas las zonas de ranging.
- (Opcional) Ser capaz de crear, configurar y estructurar la multitrama, si ésta se utiliza, en el RS\_Config-CMD.
- Tener en cuenta el R-RTI, el R-TTI, el RTG y el TTG al hacer las asignaciones.

Para la operación en modo STR, la MR-BS tiene que:

- Definir en el RS\_Config-CMD el modo de configuración que va a utilizar, si como la TTR o como la Transparente.
- Enviar la sincronización y la estructura de la trama en función de la forma de configuración que utilice.

- En el UL, recibir de las SS en la zona de acceso y de las RS en la zona de retransmisión, incluidas las zonas de ranging.
- (Opcional) Ser capaz de crear, configurar y estructurar la multitrama, si ésta se utiliza, en el RS\_Config-CMD.
- Tener en cuenta el R-RTI, el R-TTI, el RTG y el TTG al hacer las asignaciones.

### 10.4.2. Transparente

Para que el soporte a la capa PHY en modo transparente funcione correctamente las RS-T tienen que:

- Ser capaces de sincronizarse y mantener la sincronización con el preámbulo de la MR-BS.
- Recibir la estructura de la trama (DL-MAP, UL-MAP y R-MAP) en la zona de acceso del DL.
- Recibir sus datos en la zona de acceso del DL.
- Transmitir a sus subordinadas en la zona de relay del DL.
- Recibir en la zona de acceso de UL.
- Transmitir en la zona de Relay del UL.
- (Opcional) Utilizar una zona de retransmisión directa donde demodula y desentrelaza los datos que recibe y los vuelve a modular y entrelazar y los transmite (sólo en una configuración de dos saltos y utilizando end-to-end HARQ).
- (Opcional) Ser configurada para realizar diversidad cooperativa en la zona de relay.

### 10.4.3. RS-NT

Los modos de soporte a la capa PHY que se definen en este apartado no entienden de configuraciones de capa MAC, por lo que tanto una RS-NTc, como una RS-NTd, pueden utilizar los dos modos que se describen a continuación.

Para operar en modo TTR las RS-NT han de:

- Sincronizarse a través de la información recibida en el RS\_Config-CMD, y esperar la configuración al comienzo de la zona de retransmisión del DL.
- No transmitir y recibir al mismo tiempo.
- (Opcional) Utilizar una frecuencia distinta para cada una de estas etapas.
- Enviar información de sincronización (preámbulo y FCH) y control (DL-MAP y UL-MAP) al comienzo de la zona de acceso del DL para que sus estaciones subordinadas se sincronicen con ella y conozcan la estructura de la trama<sup>1</sup>, y a continuación enviar los datos a sus estaciones subordinadas.
- Tener en cuenta el R-RTI, el R-TTI, el RTG y el TTG al hacer las asignaciones.

---

<sup>1</sup>Si se trata de una TTR con planificación centralizada, esta información la sacará del RS\_Access-MAP y RS\_Relay-MAP, y si se trata de una TTR con planificación, esta información la generará ella misma.

- Al comienzo de la zona de retransmisión del DL debe recibir el R-FCH y el R-MAP de su estación superordinada y recibir los datos de ésta que ha de retransmitir a la SS.
- En el UL, recibir de sus estaciones subordinadas en la zona de acceso, y transmitir a su estación superordinada en la zona de retransmisión del UL.
- (Opcional) Interpretar la información de la multitrama que le envía la MR-BS en el RS\_Config-CMD.

El soporte STR para la capa PHY tiene las siguientes características:

- Las STR pueden transmitir y recibir a la vez. Además, pueden utilizar una portadora distinta en cada una de ellas.
- Si permite la coexistencia con las TTR, se sincroniza igual que éstas (al comienzo de la zona de retransmisión en el DL).
- Si no lo permite se sincroniza como las Transparentes (al comienzo de la zona de acceso en el DL).
- Enviar información de sincronización (preámbulo y FCH) y control (DL-MAP y UL-MAP) al comienzo de la zona de acceso del DL para que sus estaciones subordinadas se sincronicen con ella y conozcan la estructura de la trama<sup>2</sup>, y a continuación enviar los datos a sus estaciones subordinadas.
- Tener en cuenta el R-RTI, el R-TTI, el RTG y el TTG al hacer las asignaciones.
- En el UL, recibe de sus estaciones subordinadas en la zona de acceso, y transmite a su estación superordinada en la zona de retransmisión del UL.
- (Opcional) Interpretar la información de la multitrama que le envía la MR-BS en el RS\_Config-CMD.

## 10.5. Mecanismos Adicionales de la capa MAC

Existen algunos mecanismos que no encajan en ninguna de las secciones anteriores, y los vamos a tratar en este apartado. Corresponden a los apartados descritos a lo largo de la sección 7.5. Además, en él no se seguirá el esquema que en los apartados anteriores si no que se irá mecanismo a mecanismo y se indicará que acción realiza en él cada estación.

Establecimiento de rutas:

- La MR-BS tiene que asignar las rutas de acuerdo a uno de los dos mecanismos permitidos:
  - Para el embebido, la MR-BS tiene que asignar, ya sea mediante bit-partitioning o mediante contiguous block, los CID a sus estaciones subordinadas.
  - Para el explícito, la MR-BS debe enviar un DSA-REQ o DSD-REQ para crear (indicando el Path Id) o eliminar rutas.
- Las RS tiene que ser capaces de enrutar de acuerdo a cualquiera de los dos mecanismos permitidos:
  - Para el embebido, las RS tienen que ser capaces de conocer la estructura de árbol en la asignación de CID y enrutar de acuerdo a ella.

---

<sup>2</sup>Si se trata de una TTR con planificación centralizada, esta información la sacará del RS\_Access-MAP y RS\_Relay-MAP, y si se trata de una TTR con planificación distribuida, esta información la generará ella misma.

- Para el explícito, las RS han de contestar a los mensajes DSA-REQ o DSD-REQ que les envía la MR-BS con mensajes DSA-RSP o DSD-RSP según corresponda, y enrutar en consecuencia.

Alineamiento Periódico:

- Dado que los mecanismos de alineamiento periódico son idénticos a los llevados a cabo durante el alineamiento inicial, las estaciones no tendrán que implementar mecanismos adicionales, más allá de un temporizador que les fuerce a llevarlos a cabo, para incorporar este mecanismo. Los mensajes y procedimientos necesarios para llevar a cabo el alineamiento inicial fueron descritos a lo largo del apartado 10.1.

Control de Potencia Transmitida:

- Las RS deben ser capaces de recibir mensajes de control de potencia para sus enlaces en el DL y en el UL y actuar en consecuencia.
- En modo centralizado la MR-BS controla la potencia transmitida en todos los enlaces.
- (RS-NTd) Las RS serán las encargadas de llevar a cabo el control de potencia de sus estaciones subordinadas.

Repetición de R-ámbulos para sincronización:

- La MR-BS ha de calcular los parámetros del ciclo de sincronización: longitud (N), constante de desplazamiento de sincronización (Ks) y Modulo del Frame Offset y enviarlos en el RS\_Config-CMD que envía a todas las estaciones.
- Las RS han de interpretar los parámetros que reciben dentro del RS\_Config-CMD, calcular el Computed\_Frame\_Number y con él la secuencia a utilizar para enviar el R-ámbulo.
- La MR-BS puede enviar el R-ámbulo en cualquiera de las dos secuencias.
- Las RS envían el R-ámbulo en función a la secuencia obtenida.
- Las RS subordinadas se sincronizan de acuerdo al R-ámbulo de su superordinada.

Repetición de R-ámbulos para monitorización:

- (Opcional) La MR-BS envía un MR\_NBR\_INFO a las RS para indicarles quiénes son sus vecinos y cuáles son sus características.
- (Opcional) La MR-BS envía un Channel Measurement REP-REQ a ciertas RS o SS solicitando un informe sobre la medición de algún parámetro concreto.
- La MR-BS ha de calcular los parámetros del ciclo de monitorización: duración (M), intervalo (L), constante de desplazamiento de monitorización (Km) y el Modulo del Frame Offset y enviarlos en el RS\_Config-CMD que envía a todas las estaciones.
- Las RS han de interpretar los parámetros contenidos dentro del RS\_Config-CMD, calcular el Computed\_Frame\_Number y con él la secuencia C a utilizar para enviar el R-ámbulo.
- De las M tramas que dura el ciclo, las RS eligen aleatoriamente una para monitorizar.

- Al final de la monitorización, envían un RS\_MBR\_MEAS-REP o un Channel Measurement REP-RSP a la MR-BS.

Esquema centralizado de monitorización R-ámbulos:

- La MR-BS envía un Channel Measurement REP-REQ indicando el motivo y el comienzo de la monitorización.
- La MR-BS envía un RS\_Config-CMD a las RS implicadas en la medición con los parámetros del esquema: duración del esquema, intervalo entre cada transmisión y número de iteraciones.
- La RS que recibe los mensajes los interpreta y actúa en función a sus valores.
- La RS, al finalizar la medición, envía un REP-RSP con los valores obtenidos.

Medición de las interferencias en Redes Multisalto:

- Dado que el mecanismo para la medición de interferencias mediante sondeos en el UL ya estaba definido en el estándar 802.16-2009 y las acciones a realizar por las RS son las mismas que las que ya tenían que realizar las SS, no se considera que se tenga que implementar ningún mensaje o mecanismo adicional para que este procedimiento pueda ser implementado.

Baja de una RS en la red:

- La RS envía un DREG-REQ a la MR-BS para indicarle que quiere abandonar la red.
- Si la MR-BS acepta, le envía un DREG-CMD para indicarle que va a llevar a cabo tareas para llevarlo a cabo.
- Al finalizar, la MR-BS envía otro DREG-CMD para indicárselo.

Información de la ubicación de las estaciones:

- (Opcional) La MR-BS envía bajo decisión propia o por petición un MR\_LOC-REQ a las RS para que indiquen su geoposición.
- Las RS que reciben el mensaje de la MR-BS y que tengan un dispositivo de geoposición, contesta a la MR-BS mediante un MR\_LOS-RSP.

## **10.6. Conclusión**

Como se ha descrito a lo largo del capítulo la posibilidad de utilizar mecanismos de retransmisión para aumentar la cobertura de redes WiMAX está contemplado dentro de la enmienda 802.16j, que además plantea la posibilidad de utilizar mecanismos para ampliar la capacidad de estas redes.

La inclusión de estas características se ha hecho de forma que las nuevas estaciones retransmisoras (RS), sean compatibles con el estándar vigente, el 802.16-2009. Sin embargo, y pese a que no hay que realizar modificaciones en las SS existentes en el mercado, es necesario incluir nuevas capacidades en las BS disponibles para que puedan gestionar a dichas RS y aporten la funcionalidad requerida en redes multisalto.

La complejidad de las capacidades a incluir en la MR-BS depende de cuáles sean desarrolladas, puesto que multitud de ellas son opcionales, o son muy distintas en función de si se utiliza para planificación centralizada o distribuida, o con estaciones STR o TTR. Siendo la combinación planificación centralizada

de estaciones TTR la que más complejidad implicaría a la hora de diseñar dicha estación. Esto es debido a que en este caso, la MR-BS se tiene que encargar de crear la planificación para todas las estaciones de su celda y además de planificar la sincronización para que estaciones que no pueden transmitir y recibir a la vez puedan sincronizarse con su estación superordinada y a la vez mantener sincronizadas a sus estaciones subordinadas. Este hecho facilita mucho el diseño y especificaciones de las RS planificadas centralizadamente, puesto que su mayor dificultad reside en poner en práctica las planificaciones que le envíe la MR-BS, y de las RS TTR, ya que contarían con una única radio que tendría que conmutar tal y como se lo especificase su estación superordinada. Sin embargo, el uso de estas opciones genera mucho tráfico de control para que todas las estaciones reciben de forma puntual las tareas a realizar.

En el caso de las RS planificadas de forma distribuida la menor complejidad de la MR-BS se traslada a la RS, que tiene que planificar los recursos de sus estaciones subordinadas. En el caso, de las estaciones STR su complejidad radica no tanto en la utilización de dos radios, si no en la viabilidad económica de los beneficios que esto supondría. Y es que si, además, es planifica distribuidamente, se comportaría prácticamente como una MR-BS, y su precio sería similar.

La estación transparentes por su parte, son estaciones poco complejas, y que no requieren de un aumento grande de complejidad en las MR-BS, si bien es cierto que sus beneficios también son limitados.

Por lo que, en todos los casos, el fabricante tendrá que realizar un balance entre los beneficios que le supone la utilización de uno u otro método de planificación o uno u otro método de transmisión/recepción y el coste económico que le supone su implementación. Otro factor importante a tener en cuenta para que esta tecnología fructifique es a decisión del WiMAX Forum sobre la adopción de un nuevo Perfil de Certificación para que productos 16j cuenten con el certificado de interoperabilidad. En cualquier caso, la viabilidad comercial de estos equipos se analizará en detalle en el próximo capítulo.



## 11 Viabilidad industrial de equipos retransmisores en bandas libres

De acuerdo con el WiMAX Forum en la actualidad existen un total de 598 redes WiMAX desplegadas en 148 países [63]. En concreto, el desglose por continentes se muestra en el Cuadro 11.1. Sin embargo, gran parte de estos despliegues se realizan en bandas licenciadas, tal y como se puede observar en el Cuadro 11.2.

Podría argumentarse que como el WiMAX Forum fundamentalmente registra redes de operadores, que habitualmente utilizan el espectro licenciado para asegurar sus inversiones, no tiene constancia de muchas de las redes existentes en bandas no licenciadas y de uso no comercial. Sin embargo, del total de equipos facturados desde el primer trimestre de 2006 al tercer trimestre de 2009, únicamente un 3,36 % se corresponde a ventas de equipos que podrían operar en bandas libres. Este porcentaje es aún menor, puesto que en esas cifras se incluyen los equipos que operan en la frecuencia central de 4,9 GHz, que requiere licencia. Por lo que parece, que pese a que seguro que existen más de 21 redes WiMAX en el mundo utilizando bandas no licenciadas, su contribución al total no es muy significativa.

Esto muestra la tendencia que ha seguido WiMAX desde su creación y que la ha posicionado internacionalmente como una tecnología de operador en bandas licenciadas. Estos operadores son, además, las que realizan las que realizan más gasto en marketing para atraer clientes para rentabilizar sus inversiones. Es por ello que, pese a que existen multitud de fabricantes de equipos WiMAX en banda libre, no sea tan conocida esta funcionalidad de la tecnología.

En cualquier caso, y aunque los intereses de ambos actores sectores son distintos, es importante que se desarrolle un ecosistema conjunto, ya que, dada la gran cantidad de alternativas tecnológicas existentes en el mercado, el precio de los equipos es uno de los factores determinantes para su elección. Que este precio sea bajo depende de si se alcanzan economías de escala en los distintos escalones de la cadena de producción: fabricantes de chipsets, de equipos de red, de equipos finales, desarrolladores de software, etc. A continuación se describirá este ecosistema y se analizarán sus perspectivas futuras para comprobar si es viable plantear el desarrollo de equipos WiMAX que operen en banda libre en los próximos años, con el fin de analizar a continuación si es viable plantear el desarrollo de equipos de acuerdo a la enmienda 802.16j dicha banda.

Región	Despliegue	Países
África	117	43
América Latina	116	32
Asia-Pacífico	113	23
Europa del Este	85	21
Europa del Oeste	79	17
Norte América	53	2
Oriente Medio	29	10

Cuadro 11.1: Número de despliegues WiMAX por región.

Frecuencia de Operación	Despliegues
2,3 GHz	53
2,5 GHz	115
3,3 GHz	9
3,5 GHz	311
5 GHz	21

Cuadro 11.2: Despliegues según frecuencia de operación.

### 11.1. Ecosistema WiMAX

Pese a mostrar una gran fortaleza hasta el primer cuarto de 2010 [64], y tener un futuro a corto plazo en el que aún se espera un mayor crecimiento [65], el ecosistema WiMAX está viendo como su futuro a largo plazo se está viendo más que cuestionado en los últimos meses con la aparición de la tecnología TD-LTE. Hasta comienzos de año Long Term Evolution (LTE) era visto como el estándar 3GPP que supondría la evolución natural de las redes de 3G, y, por lo tanto, contaba con el soporte de las grandes compañías detrás del negocio de la telefonía móvil. Los estándares 3GPP están enfocados a la provisión de servicios de voz, que son inherentemente simétricos y para los que la duplexación por división en frecuencia (FDD) ofrece las mejores prestaciones. Para hacer uso de las mencionadas técnicas de FDD la mayoría de los operadores cuentan con licencias de espectro pareado, con una frecuencia para el canal de subida y otra para el de bajada. En este sentido FDD-LTE se veía como la tecnología a utilizar para actualizar las redes de los operadores que ya contaban con ese espectro y con la infraestructura 3G desplegada, y WiMAX como la tecnología a utilizar por los operadores que quisieran empezar de cero, puesto que las licencias de espectro no pareado (sólo útil para TDD, en la que se basa WiMAX) son del orden de 1/3 a 1/5 más baratas que las de espectro pareado<sup>1</sup>. Sin embargo, y a raíz de unos desarrollos de China Mobile para poder utilizar LTE en su espectro no pareado, que en un principio parecía que iban a ser válidas únicamente para ellos, el mundo de las comunicaciones móviles de repente comenzó a mostrar interés en la versión TDD de LTE, conocida como TD-LTE. Este interés se ha traducido en la integración de la tecnología, puesto que para ello sólo es necesario añadir un módulo a los chipsets FDD, y en el desarrollo de los primeros ensayos piloto. Estos ensayos han provocado algunos movimientos en la industria WiMAX que siembran dudas sobre su futuro [66].

A principios de año el CEO de Clearwire, el operador WiMAX con más suscriptores (cerca de 1 millón) declaró que empresa era agnóstica tecnológicamente hablando, en una clara alusión a poder dejar WiMAX en un momento dado, en favor de LTE, la máxima rival [67]. A esto hay que añadir que Yota, operador ruso de WiMAX que tiene más de medio millón de clientes, indicó a principios de Mayo su intención de desplegar sus próximas redes con TD-LTE [68].

A estas malas noticias sobre la adopción de TD-LTE frente a WiMAX de algunos operadores, hay que añadir lo ocurrido en las adjudicaciones de espectro que han tenido lugar en los últimos semanas en la India. Este país era considerado como clave para el desarrollo de la industria WiMAX dado el gran potencial que puede tener la banda ancha móvil allí [69]. Sin embargo, las licitaciones del espectro han ido siendo sistemáticamente retrasadas, con la intención de dejar pasar la crisis económica global, y obtener más beneficios de los posibles postores, y cuando se han celebrado, gran parte de los ganadores de segmentos del espectro ha mostrado su voluntad de utilizarlo para desplegar TD-LTE [70].

El hecho de que los operadores estén sembrando dudas sobre la posibilidad de utilizar LTE en vez de WiMAX, está provocando un efecto dominó en los fabricantes de equipos de red que se estén apresurando

<sup>1</sup>Información obtenida de las presentaciones del WiMAX Forum World Congress

a fabricar equipos que mediante una actualización de software podrán migrar la operación de las redes a otra tecnología [71]. Este, por ejemplo, es el caso de Motorola, uno de los baluartes de la industria WiMAX, que en los últimos días ha anunciado una nueva gama de productos de este tipo [72].

Todas estas noticias no hacen más que añadir desconfianza a la capacidad de WiMAX de aguantar el envite contra TD-LTE como tecnología alternativa para ofrecer servicios de banda ancha móvil. Sin embargo, y según la mayoría de los analistas, el crecimiento de la cantidad de tráfico que se enrute a través de las redes de banda ancha móvil es de tal magnitud [73, 74] que habrá negocio para ambas tecnologías [71]. Y en caso de que prevalezca TD-LTE, dicha cantidad de tráfico ha de ser enrutada fuera de la red a través de una infraestructura distinta a la que utilizan los usuarios, técnica conocida como offloading, para lo cual WiMAX es considerada la candidata ideal [75].

Sin embargo, y aunque en los últimos meses algunos fabricantes se hayan desligado del desarrollo de productos WiMAX [76, 77], el ecosistema creado durante los últimos cinco años quiere demostrar que es una alternativa viable. Precisamente, es en esos cinco años de experiencia en los que asienta su discurso, ya que WiMAX es una tecnología madura y contrastada que está proporcionando servicios a los usuarios en la actualidad. Y es que por mucha prisa que se quiera dar la industria LTE en madurar, aún está realizando ensayos preliminares sobre sus prestaciones y se estima en un año y medio o dos años el tiempo en que pueda ofrecer servicios a gran escala [78]. Este es el principal argumento que esgrimen los defensores de WiMAX para convencer a los operadores que quieren desplegar a día de hoy sus redes para utilizar esta tecnología, como es el caso de los operadores en India [79].

Otro de los argumentos utilizados, y en la línea con la madurez tecnológica, es que la experiencia adquirida les permite trazar una hoja de ruta para evolucionar la tecnología y evitar que se quede obsoleta [79]. Esta hoja de ruta se ha cumplido en las últimas fechas con tres hitos:

- La puesta en marcha de la iniciativa Open Retail para permitir utilizar las redes WiMAX de distintos operadores [80], lo que en el largo plazo supone beneficiarse de servicios de roaming.
- La aprobación de la enmienda al estándar para utilizar femto estaciones que permitan mejorar la cobertura en interiores de las redes WiMAX [81].
- La inclusión de una serie de mejoras en los equipos desplegados mediante actualizaciones software que permiten ampliar las prestaciones de las redes actuales hasta en un 70 %. Estas mejoras denominadas 802.16e Enhanced, ya se encontraban incluidas de forma teórica dentro del estándar 802.16-2009 [82].

El último hito en la actual hoja de ruta la constituiría la publicación del estándar IEEE 802.16m, primera tecnología que cumple con los requisitos impuestos por la ITU para ser acreditada como IMT Advanced, o lo que es lo mismo, para convertirse en la primera tecnología capaz de proporcionar servicios 4G de acuerdo a las especificaciones de la ITU [83]. La publicación de este estándar está prevista para Diciembre de 2010, y se prevé que existan equipos que implementen sus mejoras a mediados de 2011. Sin embargo, los acontecimientos de los últimos meses hacen pensar que los operadores tienen dudas sobre la posibilidad de que WiMAX pueda convertirse en la tecnología utilizada para proporcionar servicios de banda ancha móvil, lo cual pone el desarrollo de estos equipos en tela de juicio [79, 78], a la espera de lo que suceda en los próximos meses, fundamentalmente en India, puesto que podría señalar el camino a futuros operadores.

Sin embargo, TD-LTE sólo supone una amenaza para WiMAX en las bandas de 2,3 y 2,5 GHz, dado que es únicamente en esas bandas donde ambas tecnologías tienen definidos perfiles de certificación comunes. Por lo tanto, la operación de WiMAX en la banda licenciada de 3,5 GHz no está amenazada por

la aparición de LTE<sup>2</sup>. Esto no quita que también se esté enfrentado a algunos problemas en ella, debido fundamentalmente a la dificultad de proporcionar en esta banda buena cobertura en interiores, y así suponer una alternativa a los servicios cableados. Esto se ha visto reflejado cuando en las últimas semanas dos operadoras europeas, Freedom4 en el Reino Unido [84] y WorldMAX, en los Países Bajos [85], han anunciado el cese de sus operaciones.

Sin embargo, estas noticias, pese a que llegan en un mal momento e incrementan las dudas sobre la industria WiMAX, no son si no anécdotas en el panorama de la banda de 3,5 GHz, que cuenta con un mercado muy bien asentado y diversificado para los operadores WiMAX en esta banda. El principal apoyo de la industria WiMAX es el de los servicios de banda ancha en zonas donde tener acceso a estos servicios es o bien muy caro, o bien imposible. Este es el caso de multitud de zonas rurales de países desarrollados, donde operadores como Iberbanda en España [86], y de multitud de países en desarrollo donde la banda ancha es un lujo (únicamente accesible por satélite y a precios desorbitados). Este dato parece validado por el Cuadro 11.1 donde el mayor número de despliegues de redes WiMAX se da en África, América Latina y Asia.

Otro sector que la industria WiMAX considera que puede asegurar su futuro son las aplicaciones verticales, es decir aquellas aplicaciones cuyo usuario final no es un individuo si no una institución. Entre este tipo de aplicaciones destacan: el offloading [75], la conectividad para servicios públicos como hospitales o administraciones, servicios de seguridad ciudadana, los servicios a empresas o negocios con requisitos de calidad de servicio específicos para sus conexiones [66]. Entre estas últimas destaca una aplicación que está teniendo mucho éxito en los Estados Unidos denominada Smart Grid, que permite a las empresas eléctricas transmitir datos del rendimiento de sus equipos utilizando la infraestructura civil que ya tienen, para así eficientar el suministro de energía [87]. Dado que las instituciones que requieran estos servicios puede que no estén concentradas en un área concreta, es muy probable que en algunos lugares no exista un operador proporcionando servicios (como es el caso de las Smart Grid) por lo que el uso de equipos en bandas no licenciadas puede tener aplicación en este tipo de escenarios [88].

Por lo tanto, pese a todas las noticias negativas que auguran la desaparición de WiMAX en favor de LTE, existe un mercado potencial para que la maquinaria WiMAX siga funcionando pase lo que pase en el terreno de la banda ancha móvil, si bien es cierto que un futuro positivo en este escenario favorecería el desarrollo de mejores economías de escala en los dispositivos WiMAX. Dentro de esta maquinaria los equipos que permiten la operación de WiMAX en bandas no licenciadas ocupan un lugar pequeño, pero todo hace prever que su implementación no peligra en los próximos años.

## 11.2. Industria 16j

El desarrollo de la enmienda 802.16j fue liderado fundamentalmente por representantes de las empresas más importantes del mundo de las telecomunicaciones como Intel, ZTE, Huawei, Samsung o Motorola [89]. Esto hizo suponer en un inicio que el desarrollo de equipos que implementaran este modo de operación estaba prácticamente garantizado [32, 33]. Sin embargo, la situación económica global de los últimos años ha afectado de forma negativa el desarrollo de líneas de negocio alternativas para estos fabricantes. A esto también hay que añadir la aparición de la tecnología LTE, que tal y como se describió en la sección anterior, es el principal rival de WiMAX para hacerse con el mercado de los servicios de banda ancha móvil, servicios para los que está definida la enmienda 802.16j. Esto ha generado dudas en el ecosistema WiMAX dificultando la viabilidad económica de desarrollar nuevos dispositivos en los últimos años.

---

<sup>2</sup>En realidad LTE si que define en el estándar la operación en esta banda, sólo que ningún fabricante ha mostrado interés por desarrollar productos en esta banda dada la dificultad de ofrecer movilidad en ella.

Esta coyuntura no ha imposibilitado que distintas empresas se embarcaran en el desarrollo de productos 802.16j. Algunas grandes como ZTE, Fujitsu o Nortel, y otras menos conocidas como Phybit [90], Azurecomm [91], CableFree Wireless [92], o WiNetworks [93], pese a haber realizado avances al respecto, tuvieron que abandonar dichas líneas por falta de interés de la industria<sup>3</sup>. Otras como DesignArts o Intracom continúan investigando la viabilidad de la comercialización de equipos compatibles con el estándar 802.16j dentro de proyectos de investigación de la Unión Europea, el primero dentro del proyecto Rewind [94] y el segundo mediante los proyectos Fireworks [95], Morpheus [96] y Rocket [97], respectivamente. Otras empresas como Ipaxiom [98] también han anunciado que trabajan en el desarrollo de este equipamiento, pero no se ha podido contactar con ellos para comprobarlo.

Sin embargo, y pese a los esfuerzos de tantas empresas, no se ha encontrado ningún producto en el mercado que implemente los mecanismos incluidos en el estándar 802.16j. Además, en las entrevistas realizadas a miembros del comité que desarrolló la enmienda, la opinión generalizada es que nunca existirán. Mitsuo Nohara, director del Grupo de Trabajo que desarrolló la enmienda, apunta a la fecha de publicación de la misma como causa principal de su abandono. Y es que, según Nohara, la enmienda fue publicada una vez que los operadores ya habían hecho el diseño y la implementación de sus servicios y, por lo tanto, muchas de las ventajas ofrecidas por 16j no encajaban en sus planes, ya que éstas favorecen a los primeros en las etapas iniciales del despliegue de una red. Esta opinión coincide con la de otros expertos que consideran que el gasto que hacen los operadores en obtener la licencia de operación en una banda es tal, que una vez que están operando una red quieren sacar el máximo partido de ella. Esto excluye por tanto el uso de retransmisores, que utilizarían espectro reservado a los patrones de reutilización de frecuencias en celdas adyacentes para retransmitir los datos de los usuarios más alejados. Según los operadores consultados, incluso si no hay demanda suficiente en la celda y no se justifica su instalación en términos de coste<sup>4</sup>, éstos utilizarían otra estación base en lugar de un retransmisor. Su justificación es que, dado que la mayor parte de los costes fijos derivados de la ampliación de cobertura provienen de la alimentación de los equipos y de los permisos para instalarlos, se prefiere instalar una BS que garantiza el aumento de la cobertura y, además, anticipa la demanda futura de los usuarios de esa celda.

El último de los factores indicados por los expertos para justificar la falta de interés de la industria en la enmienda 802.16j proviene de la inclusión de algoritmos de retransmisión dentro del estándar 802.16m, lo que desorientó al mercado e hizo que alguno de los interesados en desarrollar la tecnología pospusieran su desarrollo. Y es que a día de hoy, aunque se tiene una idea de cómo serán, aún no están decididos los mecanismos que se definirán en el estándar 16m para la utilización de retransmisores. Lo que está claro es que estos mecanismos serán distintos por dos razones: la complejidad de los mecanismos incluidos en 16j y la necesidad de su adaptación a los mecanismos de mejora de las prestaciones que se incluyan en 16m [25].

### 11.3. Alternativas para la implementación de esquemas de retransmisión en WiMAX

Ante la complejidad del desarrollo de equipos retransmisores de acuerdo al estándar 802.16j, y ante la necesidad de cubrir algunas imperfecciones de la red, como la poca cobertura en interiores, algunos fabricantes han optado por el diseño de repetidores WiMAX analógicos. Este es el caso de Coiler, y Kyocera, que ya cuentan con productos de estas características en el mercado [99, 100] para su uso en bandas licenciadas. También Albentia ha desarrollado, dentro del marco del proyecto Open Reach, una

<sup>3</sup>Información obtenida a través de entrevistas personales.

<sup>4</sup>En el supuesto de que una RS fuera más barato que una BS.

solución similar y en la actualidad comercializa un repetidor WiMAX para la banda de 5 GHz [101].

De la implementación de 802.16m lo único que se sabe por el momento es que solamente se definirán estaciones retransmisoras no transparentes con planificación distribuida<sup>5</sup> para escenarios de 2 y 3 saltos para ampliar la cobertura e “iluminar” zonas sin ella dentro de las celdas de las BS, aunque se prevé que la configuración de dos saltos sea la que se utilice en la mayoría de los casos<sup>6</sup>. Sin embargo, varios expertos coinciden en que la complejidad de los retransmisores reside en su conceptualización, alejada de la retransmisión física considerada hasta el momento, y que, pese a su simplificación, será complicado que los operadores los tengan en cuenta. Esto es debido a que el concepto de retransmisor creado a partir de 802.16j, y ahora incluido tanto en 802.16m como en LTE-Advanced<sup>7</sup>, define un nuevo sistema de red cuya inclusión en la nueva generación de redes inalámbricas tiene implicaciones aún desconocidas. Una de ellas es la planificación, un proceso ya de por sí complejo con un único sistema, donde ahora se tendrá que considerar no sólo otro sistema, si no un sistema que puede proporcionar distintas funcionalidades a las redes multisalto. Otra de las implicaciones reside en el aumento de la complejidad a la hora de gestionar las bandas de frecuencias que posee un operador. En otras palabras, consideran que queda mucho por hacer en el diseño de simuladores que consideren todos los grados de libertad introducidos por estos sistemas y de protocolos simples de evaluación de sus resultados, antes de que los operadores se planteen su inclusión.

Incluso si estas implicaciones son tenidas en cuenta, algunas de las personas consultadas ponen en duda la viabilidad industrial de estos dispositivos, ya que algunos estudios estiman que su coste estar alrededor de 1/5 del precio de las estaciones base, lo que limitaría en gran medida las posibilidades de su desarrollo [102]. En cualquier caso, este precio dependerá de los operadores, ya que si la tecnología que finalmente utilicen, sea LTE o WiMAX, no les permite acomodar la cantidad de tráfico que se estima que en un futuro tendrán que proporcionar este tipo de redes, impulsarán el desarrollo de los retransmisores para aumentar la eficiencia de las mismas.

## 11.4. Conclusión

La tecnología WiMAX está soportada por un ecosistema robusto que, aunque últimamente esté siendo puesto en duda por la aparición de TD-LTE, tiene un gran futuro por delante, en el que se contempla su uso en bandas no licenciadas. Sin embargo, en este futuro no encajan los mecanismos incluidos en la enmienda IEEE 802.16j. El desarrollo tecnológico de estos equipos está en manos de los operadores de redes WiMAX, ya que son éstos los que condicionan que los fabricantes desarrollen equipos. Como se ha podido ver, los operadores no tienen interés en los beneficios que podrían aportar los mecanismos incluidos en la enmienda 802.16j y por lo tanto no existen en la actualidad, ni parece que existirán en el futuro. En la actualidad el uso de retransmisión en WiMAX pasa por la repetición analógica donde ya existen algunos productos, incluso en banda libre. En el futuro podrían existir productos de acuerdo a la definición de relays que se incluya en el estándar 802.16m, pero primero se tienen que terminar de definir sus características, y a continuación esperar si finalmente los operadores apuestan por él en lugar de TD-LTE.

---

<sup>5</sup>La planificación centralizada ha sido excluida por el gran overhead de control que introduce

<sup>6</sup>Estos datos han sido indicados por Junge Son, editor del Grupo de Trabajo que desarrolló la enmienda 802.16j, e involucrado en la definición de retransmisores dentro del estándar 802.16m.

<sup>7</sup>Actualización futura al estándar LTE para cumplir con los requisitos del IMT-Advanced.

## **Parte IV**

# **Conclusiones y Trabajos Futuros**



## 12 Conclusión

En el presente documento se ha estudiado la viabilidad de proponer una modificación a la enmienda IEEE 802.16j que define los mecanismos para ampliar la cobertura y las prestaciones de las redes WiMAX operando en bandas licenciadas, para su utilización en redes estáticas y operando en bandas libres, de forma que se puedan utilizar las ventajas que ofrece esta tecnología para abaratar el despliegue de redes WiMAX en zonas rurales de países en desarrollo.

Para ello se ha realizado un estudio pormenorizado en el capítulo 7 de los mecanismos definidos en el estándar que se utilizarían en despliegues fijo o nomádicos para comprobar si existía alguna limitación para su uso en bandas no licenciadas. En este sentido, y pese a que indica implícitamente en varias secciones de la enmienda que ésta se limita a la operación en ellas, no se ha encontrado ningún mecanismo o algoritmo de operación que limitara su uso a bandas licenciadas exclusivamente.

Una vez comprobado que no existía ninguna limitación en el estándar, en el capítulo 8 se ha estudiado el marco regulatorio internacional para la operación en la banda no licenciada de 5 GHz, única banda exenta de licencia contemplada por WiMAX. Este estudio ha permitido conocer cuáles son los requisitos que tiene que cumplir una tecnología inalámbrica para operar en esta banda. Éstos son de tres tipos: selección dinámica de potencia, control dinámico del nivel de potencia transmitida, y límites físicos a la máxima potencia radiada y las transmisiones fuera de banda.

Conocidos estos requisitos, se ha comprobado si el estándar 802.16-2009 los cumple y si éstos podrían ser adaptados para su utilización en redes multisalto. Como se ha mostrado en el capítulo 9, el estándar 802.16.2009 contempla y cumple con creces estos requisitos. Las redes multisalto ya contemplan en su definición el control de nivel de potencia transmitida, por lo no haría falta adaptarlo para su funcionamiento en banda no licenciadas. En cuanto a los límites a la potencia radiada, al tratarse el documento IEEE 802.16j de una enmienda, lo contemplado a nivel físico por el estándar 802.16-2009 podría ser reutilizado para redes multisalto. El mayor inconveniente lo presenta la implementación de la selección dinámica de frecuencias, aunque dado que la mayoría de mensajes necesarios para llevar a cabo dicho algoritmo son utilizados por otros mecanismos definidos en la enmienda. Por ello, los fabricantes únicamente tendrían que adaptar sus mecanismos de DFS diseñados para punto a multipunto para tener en cuenta las peculiaridades de las redes multisalto.

Con el conocimiento de los mecanismos que define la enmienda para poder utilizar redes multisalto en entornos fijos y nomádicos, y las adaptaciones que son necesarias para la operación en la banda 5 GHz, en el capítulo 10 se ha realizado un diseño de alto nivel para tratar de entender el nivel de complejidad que implicaría la implementación de estaciones que permitieran la utilización de redes multisalto en WiMAX. En este sentido, se ha comprobado que la implementación del modo centralizado permitiría que las RS fueran más sencillas, pero que la MR-BS tendría que implementar nuevos mecanismos que aumentarían considerablemente su complejidad. Por su parte, el modo distribuido permitiría que únicamente hubiera que realizar cambios menores en las BS actuales, pero que las RS soportarían mayor complejidad. Esta complejidad, sin embargo, favorece que el intercambio de mensajes de control sea mucho menor que en el caso del modo centralizado, por lo que los recursos disponibles se usarían más eficientemente.

Habiendo estudiado la viabilidad técnica, quedaba saber si sería viable su implementación real en equipos comerciales. Para ello se realizó un estudio sobre los fabricantes que podrían estar interesados en el desarrollo de estos equipos, en especial a través de los contactos obtenidos con la asistencia al WiMAX Forum World Congress 2010. Este estudio, desarrollado en el Capítulo 11, constató que pese a

que en un inicio contaba con un gran apoyo por parte de los principales fabricantes, en la actualidad la enmienda no cuenta con el apoyo suficiente por parte de los operadores como para que los fabricantes encuentren interés en desarrollar equipos de acuerdo a los mecanismos incluidos en ella. Además, en las entrevistas llevadas a cabo se descubrió que esta enmienda ha sido descartada la industria ya que, aunque se utilicen algunos mecanismos descritos en ella en la definición de retransmisores que se incluya en el estándar 802.16m, éstos serán modificados sustancialmente para simplificar su implementación.

Por lo tanto, pese a que técnicamente fuera viable la propuesta de modificación de la enmienda 802.16j para su apertura a bandas libres, el análisis del estado del arte de la industria realizado indica que esto carece de sentido, puesto que nunca existirán equipos basados en esta tecnología.

## 12.1. Trabajos Futuros

El resultado del estudio de viabilidad realizado en este proyecto ha concluido con la inviabilidad de desarrollar productos de acuerdo a la enmienda IEEE 802.16j. Pero en el transcurso de este estudio también se han encontrado otras maneras de extender la cobertura de redes WiMAX que sería interesante estudiar en el futuro. A continuación se mencionan algunos de ellos:

- Uno de los factores aludidos por los operadores para no desplegar redes multisalto fue que para los costes que conlleva conseguir los permisos de instalación de equipos inalámbricos en una localización concreta y dotarles de alimentación eléctrica autónoma, se decantaría por la instalación de estaciones base en lugar de repetidores. En muchas instalaciones de redes inalámbricas llevadas a cabo en zonas rurales de países en desarrollo también sucede que el coste de los equipos de comunicaciones, es un gasto marginal en comparación con el coste de las infraestructuras civiles [13]. En este sentido, y con la aparición en el mercado de estaciones base de menor complejidad y que soportan un menor número de usuarios [103] a precios más asequibles que las BS completas, sería interesante estudiar como se adaptaría una concatenación de redes WiMAX BS-SS en estos entornos.
- La aparición en el mercado de repetidores WiMAX en banda libre hace necesario un análisis en profundidad de sus ventajas y limitaciones frente a otras tecnologías en distintos escenarios para determinar en cuáles es recomendable su uso.
- Si bien es cierto que aún se está perfilando su definición, la inclusión de retransmisores en el estándar 802.16m es una realidad. Una vez que se concretara, y se publicara la versión definitiva del estándar, se podría realizar un estudio de similares características a las de éste, teniendo en cuenta desde el inicio las dudas existentes sobre la capacidad de esta tecnología de convertirse en un alternativa en el futuro.
- En cualquier caso, parece que el uso de retransmisores en las redes que se desplieguen en los próximos años, ya sea en WiMAX o en LTE, ha sido contemplado desde el punto de vista tanto teórico, como práctico. Este hecho plantea distintos retos que habrán de ser resueltos en los próximos años alrededor de la complejidad introducida en la planificación de red por la inclusión de relays. En este sentido, la optimización de la ubicación de los RS, la planificación de frecuencias o la autoconfiguración de la red son temas que tendrán que ser estudiados.

## Bibliografía

- [1] ONU and UIT, “Compromiso de Túnez.” in *WSIS 2005*, Tunes, Noviembre 2005.
- [2] J. Aker, “Does Digital Divide or Provide? The Impact of Cell Phones on Grain Markets in Niger.” Department of Agricultural and Resource Economics, University of California, Berkeley., Tech. Rep., 2008. [Online]. Available: [papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1093374](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1093374)
- [3] G. Clarke and S. Wallsten, “Has the Internet Increased Trade? Evidence from Industrial and Developing Countries,” *Economic Inquiry*, vol. 44, no. 3, pp. 465–484, 2006.
- [4] P. Jensen, “The digital divide: Information (technology), market performance and welfare in the south indian fisheries sector,” *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 122, no. 3, pp. 879–924, 2007.
- [5] M. Khalil, P. Dongier, and C. Zheng-Wei, *Information and Communications for Development 2009: Extending Reach and Increasing Impact*. World Bank, 2009.
- [6] X. Rice. Poverty-stricken Rwanda puts its faith and future into the wide wired world. 1 de Agosto de 2006. The Guardian. [Online]. Available: <http://www.guardian.co.uk/world/2006/aug/01/mobilephones.rwanda>
- [7] D. McCarthy. Cable makes big promises for African Internet. 27 de Julio de 2009. CNN. [Online]. Available: [edition.cnn.com/2009/TECH/07/22/seacom.on/index.html](http://edition.cnn.com/2009/TECH/07/22/seacom.on/index.html)
- [8] T. Standage, “Mobile Marvels: A special report on telecoms in emerging markets,” in *The Economist*, Septiembre 2009.
- [9] ITU. (2005, Julio) ITU Launches New Development Initiative to Bridge the Digital Divide. Partnership will be the key to connecting communities. [Online]. Available: [http://www.itu.int/newsroom/press\\_releases/2005/07.html](http://www.itu.int/newsroom/press_releases/2005/07.html)
- [10] American Council for the United Nations University (AC/UNU), *Global Challenges Facing Humanity. The Millennium Project: Global Futures Studies and Research*. American Council for the United Nations University, 2006. [Online]. Available: [www.acunu.org/millennium/Global\\_Challenges/chall-06.html](http://www.acunu.org/millennium/Global_Challenges/chall-06.html)
- [11] G. Cayla, S. Cohen, and D. Guigon, “WiMAX an Efficient Tool to Bridge the Digital Divide,” WiMAX Forum, Tech. Rep., 2005. [Online]. Available: [www.wimaxforum.org/technology/downloads](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads)
- [12] A. Martínez, V. Villarroel, and J. Seoane F del Pozo, “Analysis of information and communication needs in rural primary healthcare in developing countries.” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9(1), 2005.
- [13] I. Bebea, “Diseño de un plan de sostenibilidad para redes de comunicaciones rurales: Estudio del caso napo.” Master’s thesis, Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, Marzo 2010.

- [14] F. J. Simó Reigadas, “Modelado y optimización de ieee 802.11 para su aplicación en el despliegue de redes extensas en zonas rurales aisladas de países en desarrollo.” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Enero 2007.
- [15] Fundación Enlace Hispanoamericano de Salud (EHAS). [Online]. Available: [www.ahas.org](http://www.ahas.org)
- [16] Technology and Infraestructure for Emerging Regions (TIER Group). [Online]. Available: <http://tier.cs.berkeley.edu/wiki/Home>
- [17] Airjaldi. [Online]. Available: <http://drupal.airjaldi.com/>
- [18] Nepal Wireless. [Online]. Available: [www.nepalwireless.net](http://www.nepalwireless.net)
- [19] Grupo de Telecomunicaciones Rurales - Pontificia Universidad Católica del Perú (GTR-PUCP). [Online]. Available: <http://gtr.telecom.pucp.edu.pe/>
- [20] M. Mandioma, K. Rao, A. Terzoli, and H. Muyingi, “A Study on WiMax Implementation at Dwesa-Cwebe Rural Areas of Eastern Cape of South Africa,” in *IEEE TENCON 2006*, Hong Kong, Noviembre 2006.
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, *IEEE 802.16-2004 Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fix Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Computer Society, 2004.
- [22] Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, *802.16-2009 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Wireless Access Systems*. IEEE Computer Society, 2009.
- [23] Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, *802.16j-2009 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems-Amendment 1: Multihop Relay Specification*. IEEE Computer Society, 2009.
- [24] M. Paolini, “Leveraging 802.16e WiMAX Technology in Licence-Exempt Bands,” Available [www.senzafiliconsulting.com](http://www.senzafiliconsulting.com), 2009, White Paper - Senza Fili Consulting.
- [25] A. Bacioccola, C. Cicconetti, C. Eklund, L. Lenzini, L. Li, and E. Mingozzi, “IEEE 802.16: History, status and future trends,” *Computer Communications*, vol. 33, pp. 113–123, November 2009.
- [26] Alvarion. (2009) Alvarion Unveils Industry’s First 802.16e WiMAX Solution for License-Exempt Frequency. [Online]. Available: [www.alvarion.com/index.php/en/news-a-events/global-press-releases](http://www.alvarion.com/index.php/en/news-a-events/global-press-releases)
- [27] IEEE 802.16 Licence Exempt Task Group, “IEEE 802.16m-07/002r10,” Draft, Tech. Rep., 2010. [Online]. Available: [www.ieee802.org/16/tgm/docs/80216m-07\\_002r10.pdf](http://www.ieee802.org/16/tgm/docs/80216m-07_002r10.pdf)
- [28] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [29] M. Hasna and M. Alouini, “End-to-end performance of transmission systems with relays over rayleigh-fading channels,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 6, pp. 1126–1131, November 2003.

- [30] E. Morgado, I. Mora-Jimenez, J. J. Vinagre, J. Ramos, and A. Caamano, "End-to-end average ber in multihop wireless networks over fading channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 2010.
- [31] F. Roemer, E. Jorswieck, and M. Haardt, *Efficient Spatial Processing and Resource Allocation for Amplify and Forward Two-way Relaying*. Troubador Publishing Ltd, 2010.
- [32] S. W. Peters and R. W. Heath, "The future of WiMAX: Multihop relaying with IEEE 802.16j," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 1, pp. 104–111, 2009.
- [33] V. Genc, S. Murphy, Y. Yu, and J. Murphy, "IEEE 802.16j Relay-based Wireless Access Networks: An Overview," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 15, no. 5, pp. 56–63, October 2008.
- [34] (2009) Wimax forum web page. WiMAX Forum. [Online]. Available: <http://www.wimaxforum.org/>
- [35] M. Okuda, C. Zhu, and D. Viorel, "Multihop-Relay Extension for WiMAX Networks - Overview and Benefits of IEEE 802.11j Standard," in *Fujitsu Sci. Tech. Journal*, no. 44, Sidney, Australia, jul 2008, pp. 292–302.
- [36] S. Peters and R. Heath, "The future of wimax: Multihop relaying with ieee 802.16j," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 1, pp. 104 –111, January 2009.
- [37] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, and G. Mao, "Relay technologies for wimax and lte-advanced mobile systems," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 10, pp. 100 –105, October 2009.
- [38] Z. Wei, "Capacity Analysis for Multi-hop WiMAX Relay," in *Proc. Auswireless 2006*, Australia, 2006.
- [39] Bian, Y.Q. and Nix, A.R. and Sun, Y. and Strauch, P., "Performance Evaluation of Mobile WiMAX with MIMO and Relay Extensions," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE*, March 2007, pp. 1814 –1819.
- [40] R. Schoenen, W. Zirwas, and B. H. Walke, "Raising Coverage and Capacity Using Fixed Relays in a Realistic Scenario," in *Proc. 14th European Wireless Conference (EW'08)*, June 2008, pp. 1–6.
- [41] A. Davydov, A. Papathanassiou, and A. Maltsev, "System Level Comparison of Relay and RF Repeater Based Technologies in WiMAX Systems," in *Mobile WiMAX Symposium, 2009. MWS '09. IEEE*, July 2009, pp. 205 –208.
- [42] A. Bel, J. Vicario, and G. Seco-Granados, "The Benefits of Relay Selection in WiMAX Networks," in *Proc. ICT Mobile Summit*, 2008.
- [43] K. Sundaresan and S. Rangarajan, "On exploiting diversity and spatial reuse in relay-enabled wireless networks," in *MobiHoc '08: Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 13–22.
- [44] S. Deb, V. Mhatre, and V. Ramaiyan, "WiMAX relay networks: opportunistic scheduling to exploit multiuser diversity and frequency selectivity," in *MobiCom '08: Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 163–174.

- [45] C.-Y. Chang, C.-T. Chang, M.-H. Li, and C.-H. Chang, "A Novel Relay Placement Mechanism for Capacity Enhancement in IEEE 802.16j WiMAX Networks," in *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, June 2009, pp. 1–5.
- [46] Niyato, D. and Hossain, E. and Dong In Kim and Zhu Han, "Joint Optimization of Placement and Bandwidth Reservation for Relays in IEEE 802.16j Mobile Multihop Networks," in *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, June 2009, pp. 1–5.
- [47] Niyato, D. and Hossain, E. and Dong Kim and Zhu Han, "Relay-centric Radio Resource Management and Network Planning in IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 12, pp. 6115–6125, December 2009.
- [48] A. Bletsas, H. Shin, and M. Win, "Cooperative Communications with Outage-Optimal Opportunistic Relaying," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 9, pp. 3450–3460, September 2007.
- [49] F. Gordejuela-Sanchez, D. Lopez-Perez, and J. Zhang, "Frequency Planning in IEEE 802.16j Networks: An Optimization Framework and Performance Analysis," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009. IEEE*, April 2009, pp. 1–6.
- [50] D. López-Pérez, A. Juttner, and J. Zhang, "Optimization methods for dynamic frequency planning in OFDMA networks," in *Networks'08*, May 2008.
- [51] C.-J. Chang, C.-M. Yen, F.-C. Ren, and C.-H. Chuang, "QoS GTE: A Centralized QoS Guaranteed throughput Enhancement Scheduling Scheme for Relay-Assisted WiMAX Networks," in *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, May 2008, pp. 3863–3867.
- [52] P. Mogre, M. Hollick, S. Dimitrov, and R. Steinmetz, "Incorporating Spatial Reuse into Algorithms for Bandwidth Management and Scheduling in IEEE 802.16j Relay Networks," in *Local Computer Networks, 2009. LCN 2009. IEEE 34th Conference on*, October 2009, pp. 384–391.
- [53] V. Sagar and D. Das, "Modified EDF Algorithm and WiMAX Architecture to Ensure end-to-end Delay in Multi-hop Networks," in *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*, November 2008, pp. 1–6.
- [54] S. Morosi, D. Marabissi, R. Fantacci, E. Del Re, and S. Jayousi, "Simple Cooperative Relaying Strategies for WiMAX Communication System," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009. IEEE*, April 2009, pp. 1–6.
- [55] David Couso Saiz, *El espectro radioeléctrico. Una perspectiva multidisciplinar: Presente y ordenación jurídica del espectro radioeléctrico*. Noticias Jurídicas, 2007.
- [56] ETSI, "Broadband radio access networks (brn); 5 ghz high performance rlan; harmonized en covering essential requirements of article 3.2 of the r&tte directive." 2006.
- [57] Federal Communications Commission (FCC). In the matter of Revision of Parts 2 and 15 of the Commission's Rules to Permit Unlicensed National Information Infrastructure (U-NII) devices in the 5 GHz band. Memorandum Opinion and Order.
- [58] International Telecommunications Union (ITU). Radio Regulation ITU-R 5,150. [Online]. Available: [www.itu.int](http://www.itu.int)

- [59] ERC, “Erc decision of 29 november 1999 on the harmonised frequency bands to be designated for the introduction of high performance radio local area networks (hiperlans).” 1999.
- [60] Federal Communications Commission (FCC). FCC Online Table of Frequency Allocations. [Online]. Available: [www.fcc.gov](http://www.fcc.gov)
- [61] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R M.1652. [Online]. Available: [www.itu.int](http://www.itu.int)
- [62] ——. Recommendation ITU-R M.1653. [Online]. Available: [www.itu.int](http://www.itu.int)
- [63] J. Singer, “WiMAX Forum Industry Research Report May, 2010.” WiMAX Forum, Tech. Rep., May 2010. [Online]. Available: <http://www.wimaxforum.org/resources/monthly-industry-report>
- [64] Maravedis. 4G Quarterly Report. 23 de Junio de 2010. Montreal, Canada. [Online]. Available: <http://www.4gcounts.com/>
- [65] In-Stat. Global WiMAX Subscribers, Base Stations, and Revenues. Junio de 2010. [Online]. Available: <http://www.instat.com/abstract.asp?id=281&SKU=IN1004788WBB>
- [66] M. Paolini. TD-LTE: The most powerful weapon in the LTE arsenal against WiMAX. 29 de Mayo de 2010. [Online]. Available: <http://www.fiercebroadbandwireless.com/story/td-lte-most-powerful-weapon-lte-arsenal-against-wimax/2010-03-29>
- [67] S. Lawson. Sprint, Clearwire Warm Up to LTE. 24 de Marzo de 2010. CIO. [Online]. Available: [www.cio.com/article/588046/Sprint\\_Clearwire\\_Warm\\_Up\\_to\\_LTE?page=2&taxonomyId=3061](http://www.cio.com/article/588046/Sprint_Clearwire_Warm_Up_to_LTE?page=2&taxonomyId=3061)
- [68] M. Ricknäs. Devices Key As WiMax Supporter Moves to LTE. [Online]. Available: [www.cio.com/article/595209/Devices\\_Key\\_As\\_WiMax\\_Supporter\\_Moves\\_to\\_LTE](http://www.cio.com/article/595209/Devices_Key_As_WiMax_Supporter_Moves_to_LTE)
- [69] S. Bakhshi. Analyst Angle: BWA in India: WiMAX, TD-LTE and things in the rearview mirror. RCRWireless. 5 de Mayo de 2010. RCRWireless. [Online]. Available: [http://www.rcrwireless.com/article/20100505/SPECTRUM\\_AUCTION/100509967/Analyst-Angle--BWA-in-India--WiMAX--TD-LTE-and-things-in-the-rearview-mirror](http://www.rcrwireless.com/article/20100505/SPECTRUM_AUCTION/100509967/Analyst-Angle--BWA-in-India--WiMAX--TD-LTE-and-things-in-the-rearview-mirror)
- [70] ——. Analyst Angle: BWA spectrum auction leaves a changed telecom landscape in India. 14 de Junio de 2010. RCRWireless. [Online]. Available: [http://www.rcrwireless.com/article/20100614/SPECTRUM\\_AUCTION/100619958/1104/analyst-angle-special-edition-bwa-spectrum-auction-leaves-a](http://www.rcrwireless.com/article/20100614/SPECTRUM_AUCTION/100619958/1104/analyst-angle-special-edition-bwa-spectrum-auction-leaves-a)
- [71] J. Baker. WiMAX Goes Defensive. Muniwireless. 24 de Junio de 2010. [Online]. Available: [http://www.muniwireless.com/2010/06/24/wimax-goes-defensive/?utm\\_source=feedburner&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=Feed:+muniwireless+\(MuniWireless\)](http://www.muniwireless.com/2010/06/24/wimax-goes-defensive/?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed:+muniwireless+(MuniWireless))
- [72] Zumbeel. Motorola’s New Solution For WiMAX RAN. 24 de Junio de 2010. [Online]. Available: [http://zumbeel.net/beta/news/details.php?rev\\_param=7085](http://zumbeel.net/beta/news/details.php?rev_param=7085)
- [73] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2009-2014. 9 de Febrero de 2010. [Online]. Available: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html)
- [74] E. Schonfeld. Mobile Data Traffic Expected To Rise 40-Fold Over Next Five Years. 30 de Marzo de 2010. [Online]. Available: <http://techcrunch.com/2010/03/30/mobile-data-traffic-rise-40-fold/>

- [75] Going WiMAX. The role of WiMAX in enabling Wi-Fi data offload networks. 10 de Marzo de 2010. [Online]. Available: <http://www.goingwimax.com/the-role-of-wimax-in-enabling-wi-fi-data-offload-networks-9406/>
- [76] Computer World. Cisco to stop developing WiMax radios. 8 de Marzo de 2010. [Online]. Available: [http://blogs.computerworld.com/15713/cisco\\_to\\_stop\\_developing\\_wimax\\_radios](http://blogs.computerworld.com/15713/cisco_to_stop_developing_wimax_radios)
- [77] Meyer, D. Alcatel-Lucent: WiMax lost against LTE. ZDnet. 3 de Febrero de 2010. [Online]. Available: <http://www.zdnetasia.com/alcatel-lucent-wimax-lost-against-lte-62060944.htm>
- [78] Townsend, C. What Factors Should Operators Consider When Planning WiMAX or TD-LTE Networks? 24 de Junio de 2010. [Online]. Available: [http://www.wirelessobserver.net/2010\\_06\\_24/what-factors-should-operators-consider-when-planning-wimax-or-td-lte-networks.html](http://www.wirelessobserver.net/2010_06_24/what-factors-should-operators-consider-when-planning-wimax-or-td-lte-networks.html)
- [79] Brighth, J. The need for a migration path to LTE sounds like surrender for WiMAX. 24 de Junio de 2010. [Online]. Available: <http://www.telecoms.com/21274/the-need-for-a-migration-path-to-lte-sounds-like-surrender-for-wimax/>
- [80] WiMAX Forum. WiMAX Open Retail Initiative. Abril de 2010. [Online]. Available: <http://www.wimaxforum.org/certification/open-retail>
- [81] Luna, L. Femto Forum, WiMAX Forum publish WiMAX femtocell standard. 20 de junio de 2010. Fierce Broadband Wireless. [Online]. Available: <http://www.fiercebroadbandwireless.com/story/femto-forum-wimax-forum-publish-wimax-femtocell-standard/2010-06-20#ixzz0rxRFcHsX>
- [82] Hardware Zone. Motorola Drives '802.16e Enhanced' Features into WiMAX Roadmap. 18 de junio de 2010. [Online]. Available: <http://www.hardwarezone.com.sg/tech-news/view/47134>
- [83] B. Barret. Intel, Motorola, Samsung and Others Unite Behind WiMax 2. 12 de Abril de 2010. Gizmodo. [Online]. Available: [gizmodo.com/5515013/intel-motorola-samsung-and-others-unite-behind-wimax-2](http://gizmodo.com/5515013/intel-motorola-samsung-and-others-unite-behind-wimax-2)
- [84] J. Baker. Is WiMAX a failure in the UK? Muniwireless. 21 de Junio de 2010. [Online]. Available: <http://www.muniwireless.com/2010/06/21/is-wimax-a-failure-in-the-uk/>
- [85] E. Vos. Another WiMAX Operator bites the dust: Worldmax shuts WiMAX network in Amsterdam. Muniwireless. 22 de Junio de 2010. [Online]. Available: <http://www.muniwireless.com/2010/06/22/worldmax-shuts-wimax-in-amsterdam/>
- [86] Iberbanda. [Online]. Available: <http://www.iberbanda.es>
- [87] Churchill, S. Smart Grid WiMAX Lives. Daily Wireless. 16 de junio de 2010. [Online]. Available: <http://www.dailywireless.org/2010/06/16/smart-grid-wimax-lives/>
- [88] Paolini, M. Extending the benefits of WiMAX to unlicensed bands. WiMAX Times. 18 de Noviembre de 2009. [Online]. Available: <http://www.wimaxtimes.com/blog/monica-paolini/extending-benefits-wimax-unlicensed-bands>
- [89] IEEE 802.16. IEEE's Relay Task Group. [Online]. Available: [www.ieee802.org/16/relay/](http://www.ieee802.org/16/relay/)
- [90] Phybit, "Wireless Design Services." [Online]. Available: [www.phybit.com/docs/showpieces.pdf](http://www.phybit.com/docs/showpieces.pdf)
- [91] Azurecomm, "Azurecomm announces mobile WiMAX™ 802.16e Single Sector Base Stations for trials in late 2007." [Online]. Available: [azurecomm.com/products-faq.htm](http://azurecomm.com/products-faq.htm)

- [92] CableFree Wireless. CableFree WiMax 802.16e MicroBS – Product Overview. [Online]. Available: [www.acenet.hu/~teletechnikakft/Cablefree/CableFreeWiMax802\\_16eMicroBS.pdf](http://www.acenet.hu/~teletechnikakft/Cablefree/CableFreeWiMax802_16eMicroBS.pdf)
- [93] Ruggedcom. WiNetworks Selected as Finalist for Best of WiMAX World Europe Awards' Industry Choice. 24 de Mayo de 2007. [Online]. Available: [www.ruggedcom.com/about/news/pages/05.24.07/](http://www.ruggedcom.com/about/news/pages/05.24.07/)
- [94] REWIND. REWIND: RElay based Wireless Networks and standarD. [Online]. Available: [www.rewind-project.eu/about.htm](http://www.rewind-project.eu/about.htm)
- [95] FIREWORKS. FIREWORKS: FlexIble RElay Wireless OFDM-based netwoRKS. [Online]. Available: <http://fireworks.intranet.gr/deliverables.asp>
- [96] MORPHEUS. MORPHEUS: Multi-purPose dynamically Reconfigurable Platform for intensive HEterogeneoUS processing. [Online]. Available: <http://www.morpheus-ist.org/pages/test.htm>
- [97] ROCKET. Rocket: Reconfigurable OFDMA-based cooperative networks enabled by agile SpecTrum use. [Online]. Available: [www.ict-rocket.eu/](http://www.ict-rocket.eu/)
- [98] Ipaxiom, "Data Sheet XMaX7000-1 16e BST V1." [Online]. Available: [www.ipaxiom.com/XMaX7000\\_802.16e\\_Wave2\\_BST.pdf](http://www.ipaxiom.com/XMaX7000_802.16e_Wave2_BST.pdf)
- [99] Coiler. WiMAX TDD Repeaters. 2010. [Online]. Available: [http://www.coiler.com.tw/products\\_wimax.asp](http://www.coiler.com.tw/products_wimax.asp)
- [100] Kyocera. Home/SME Repeater. 2010. [Online]. Available: [http://global.kyocera.com/prdct/telecom/office/wimax/home\\_sme\\_repeater/index.html](http://global.kyocera.com/prdct/telecom/office/wimax/home_sme_repeater/index.html)
- [101] Albentia Systems. Repetidores WiMAX. [Online]. Available: [www.albentia.com/productos.php?productID=WiMAXRepeater](http://www.albentia.com/productos.php?productID=WiMAXRepeater)
- [102] WINNER. Winner:Wireless World Initiative New Radio. [Online]. Available: <http://www.ist-winner.org/>
- [103] Tranzeo. TR-WMX 5.8 GHz PlusG PICO Base Station. [Online]. Available: <http://www.tranzeo.com/products/radios/TR-WMX-5.8-GHz-PlusG-PICO-Base-Station>