



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

**ANÁLISIS DE LA INCLUSIÓN DE  
ESTACIONES RELAY EN UN SISTEMA  
DE COMUNICACIONES MÓVILES  
OFDMA Y GESTIÓN DE RECURSOS  
RADIO PARA LA NUEVA  
INFRAESTRUCTURA**

MÁSTER TICRM (TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y  
COMUNICACIONES EN REDES MÓVILES)  
CURSO 2009-2010

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
SEPTIEMBRE 2010

**AUTOR:** VANESA MONTERO FERNÁNDEZ  
**DIRECTOR:** DRA. ÁNGELA HERNÁNDEZ SOLANA



CENTRO POLITÉCNICO  
SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
COMUNICACIONES



# “Análisis de la inclusión de estaciones relay en un sistema de comunicaciones móviles OFDMA y gestión de recursos radio para la nueva infraestructura”

## Resumen

Los sistemas celulares actuales para comunicaciones inalámbricas, en los que una estación base sirve a todos los usuarios de una celda, presentan casos críticos a la hora de que todos los móviles puedan recibir un servicio adecuado y conseguir una cobertura ubicua. Claro está que los móviles cercanos a una estación base recibirán en el enlace descendente (DL-*DownLink*) y transmitirán en el enlace ascendente (UL-*UpLink*) con más holgura que los usuarios que se encuentran en el exterior de la celda, pues éstos requieren mayor potencia para obtener una SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*) adecuada al estar más cerca de celdas adyacentes que provocan sobre los mismos una elevada interferencia. Además estos usuarios problemáticos no pueden recibir/transmitir con toda la potencia que podrían requerir, pues hay que imponer determinadas restricciones que limiten el perjuicio que su transmisión implica sobre otros usuarios de la red. Así, los usuarios que se encuentran en el exterior de la célula, o más genéricamente hablando, aquéllos que poseen con la estación base de la que deben recibir servicio unas malas condiciones de canal, provocan la necesidad de implementación de nuevas técnicas que mejoren su situación y no limiten la capacidad de la celda.

Una solución adecuada podría ser el despliegue de un mayor número de estaciones base con la consecuente reducción del tamaño de las celdas y el beneficio que ello provoca sobre las condiciones de canal de los usuarios, aunque el coste de infraestructura sería excesivo. Sobre este concepto de reducir virtualmente el tamaño de la celda, surge la idea de la búsqueda de nuevas entidades más sencillas, y por lo tanto de menor coste, y que sirvan de soporte auxiliar para los casos en los que el enlace directo entre una estación base y un usuario no es lo suficientemente bueno como para garantizar la calidad del servicio. Estas entidades son las estaciones relay, que podrían entenderse como pequeñas estaciones base con menor autonomía y de más sencilla implementación, que formarían junto con la infraestructura estándar un sistema multisalto, y para las que no es necesaria una comunicación cableada con las estaciones base ni entre ellas, sino *wireless*.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es estudiar el impacto que se deriva de la inclusión de nodos relays en la infraestructura de un sistema de comunicaciones móviles de banda ancha OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el enlace descendente y analizar y proponer diferentes métodos de gestión de recursos radio, de modo que el gasto extra de los mismos, requerido para el soporte de un mayor número de enlaces, pueda verse compensado por técnicas que aprovechen el espectro de una manera más agresiva, sin que ello derive en un elevado aumento de la interferencia que supondría un perjuicio en el funcionamiento de la red.



# Índice General

---

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Referencias</b>	<b>XI</b>
<b>Abreviaturas y Acrónimos</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción a los sistemas en modo Relay.....	1
<b>2. RRM en Modo Relay</b>	<b>5</b>
2.1 RRM en modo Relay, análisis teórico.....	5
<b>3. Resultados obtenidos</b>	<b>17</b>
3.1 Análisis de resultados.....	17
3.2 Algoritmo propuesto.....	28
<b>4. Conclusiones y Líneas Futuras</b>	<b>35</b>
4.1 Conclusiones.....	35
4.2 Líneas Futuras.....	36
<b>ANEXOS</b>	<b>37</b>
<b>A. Tipos de Estaciones Relay</b>	<b>39</b>
A.1 Aplicaciones de los Nodos Relay.....	39
A.2 Scheduling en Modo Relay.....	41
A.3 Tipos de estaciones Relay.....	42
A.4 Modos de aplicación en función del tipo de Relay.....	45
<b>B. Señalización en Modo Relay</b>	<b>49</b>
B.1 Estructura de trama MAC Modo Relay.....	49
B.1.1 Señalización para el modo transparente (Tipo 2).....	56
B.1.2 Señalización para el modo no transparente (Tipo 1).....	60
B.2 Mapeado de mecanismos de recuperación de errores.....	66
B.2.1 Temporización HARQ.....	66
B.3 HARQ en Modo Relay.....	69
B.3.1 Relays Transparentes (Tipo 2).....	69

B.3.2 Relays no Transparentes (Tipo 1).....	73
<b>C. Escenario de evaluación</b>	<b>83</b>
C.1 Parámetros de evaluación.....	83
<b>D. Simulaciones previas</b>	<b>87</b>
D.1 Resultados de las simulaciones.....	87

# Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Enlaces soportados en un sistema de comunicaciones móviles en modo relay.....	2
<b>Figura 2.1.</b> Estructura básica de un sistema multisalto con relays.....	5
<b>Figura 2.2.</b> Modo de funcionamiento no-transparente.....	6
<b>Figura 2.3.</b> Modo de funcionamiento transparente.....	7
<b>Figura 2.4.</b> Ejemplo de esquema de partición de recursos para un despliegue de 6 RS por R_BS. Se asume multiplexado TD entre el backhaul y el enlace de acceso al relay [16].....	8
<b>Figura 2.5.</b> Ejemplos de distintas opciones de partición de recursos para las transmisiones de R_BS y RS [16].....	8
<b>Figura 2.6.</b> Algoritmo de reuso frecuencial PF7.....	9
<b>Figura 2.7.</b> Ejemplos de algoritmo de reuso frecuencial PF4.....	9
<b>Figura 2.8.</b> Algoritmo de reuso frecuencial PF3.....	10
<b>Figura 2.9.</b> Esquema de subtramas para modo relay, relays half-duplex.....	13
<b>Figura 2.10.</b> Definición de subtramas unicast tras $N_{TTI}$ subtramas blancas consecutivas.....	14
<b>Figura 2.11.</b> Número de UE soportados en la red en función del método RRM implementado...	15
<b>Figura 3.1.</b> SINR obtenida en PF7 despliegue 1, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	21
<b>Figura 3.2.</b> SINR obtenida en PF7 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	22
<b>Figura 3.3.</b> SINR obtenida en PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	22
<b>Figura 3.4.</b> SINR obtenida en PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	22
<b>Figura 3.5.</b> SINR obtenida en PF3, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	23
<b>Figura 3.6.</b> SINR obtenida en cada algoritmo RRM simulado, MCS adaptativa.....	25
<b>Figura 3.7.</b> Esquema de coordinación para relays half-duplex.....	26
<b>Figura 3.8.</b> Interferencias potenciales en el enlace backhaul, PF4 despliegue 2, relays half-duplex.....	27
<b>Figura 3.9.</b> SINR obtenida para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex.....	28
<b>Figura 3.10.</b> Algoritmo RRM en modo relay propuesto.....	29
<b>Figura 3.11.</b> SINR obtenida para el método propuesto, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex.....	29
<b>Figura 3.12.</b> SINR obtenida para el método propuesto, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex con reserva de recursos para el enlace backhaul.....	30
<b>Figura 3.13.</b> SINR obtenida para el método propuesto, MCS adaptativa, simulación relays half-duplex.....	31
<b>Figura 3.14.</b> SINR obtenida para un sistema de comunicaciones infraestructura estándar vs. sistema en modo relay, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	33

<b>Figura 3.10.</b> SINR obtenida para un sistema de comunicaciones infraestructura estándar vs. sistema en modo relay, MCS adaptativa.....	33
<b>Figura A.1.</b> Uso de Estaciones Relay para extender la cobertura.....	40
<b>Figura A.2.</b> Uso de Estaciones Relay para aumentar la capacidad en los bordes de la célula y balancear la capacidad en el área celular.....	40
<b>Figura A.3.</b> Celda en modo relay.....	40
<b>Figura A.4.</b> Uso de Estaciones Relay para cubrir zonas de sombra.....	41
<b>Figura A.5.</b> Uso de nodos relay compartidos por varias celdas.....	41
<b>Figura A.6.</b> Área de cobertura en modo cooperativo, relays tipo II.....	46
<b>Figura A.7.</b> Área de cobertura en modo no cooperativo, relays tipo II.....	47
<b>Figura B.1.</b> Mapeado frecuencial de las transmisiones en el backhaul y enlace de acceso al relay.....	50
<b>Figura B.2.</b> Opciones de mapeado frecuencial de las transmisiones en el backhaul para duplexado FDD.....	51
<b>Figura B.3.</b> Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay DL.....	53
<b>Figura B.4.</b> Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay UL.....	53
<b>Figura B.5.</b> Nomenclatura de los canales de los diferentes enlaces en modo relay.....	54
<b>Figura B.6.</b> Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay FDM DL.....	54
<b>Figura B.7.</b> Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay TDM DL.....	55
<b>Figura B.8.</b> Zona relay dinámica mediante particiones (R-PDCCH y datos backhaul TDM) DL....	55
<b>Figura B.9.</b> Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay FDM/TDM DL.....	56
<b>Figura B.10.</b> Comunicación RS->UE usando subtramas normales (izquierda) y comunicación R_BS->RS usando subtramas blanca (derecha) multiplexadas TDM.....	57
<b>Figura B.11.</b> Estructura de la subtrama blanca en la que la información de control R-PDCCH va mapeada en los mismos recursos que la información de control a los macro UEs (primeros símbolos OFDM).....	57
<b>Figura B.12.</b> Estructura de la subtrama en la que el RS puede mandar los datos a sus UEs ya que no requiere recibir señalización.....	57
<b>Figura B.13.</b> Estructura de la subtrama blanca en la que la información de control semi-estática R-PDCCH va mapeada en distintos recursos que la información de control a los macro UEs.....	58
<b>Figura B.14.</b> Estructura de la subtrama blanca en la que la información de control dinámica R-PDCCH va mapeada en distintos recursos que la información de control a los macro UEs.....	58
<b>Figura B.15.</b> Estructura de la subtrama UE => RS para relay half-duplex.....	58
<b>Figura B.16.</b> Estructura de la subtrama RS => R_BS para relay half-duplex.....	59
<b>Figura B.17.</b> Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control conjunta a la de los usuarios.....	59
<b>Figura B.18.</b> Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control a parte de la de los usuarios.....	59
<b>Figura B.19.</b> Estructura de la subtrama UL para relay full-dúplex.....	60
<b>Figura B.20.</b> Subtramas del enlace backhaul y access decaladas temporalmente.....	62
<b>Figura B.21.</b> Subtramas del enlace backhaul y access con recursos específicos para la señalización R_BS->RS.....	62

<b>Figura B.22.</b> Estructura de la subtrama blanca con información de control semi-estática R-PDCCH.....	63
<b>Figura B.23.</b> Estructura de la subtrama blanca con información de control dinámica R-PDCCH.....	63
<b>Figura B.24.</b> Estructura de la subtrama en la que el RS no recibe información de control y puede mandar los datos a sus UEs.....	63
<b>Figura B.25.</b> Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control semi-estática.....	64
<b>Figura B.26.</b> Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control dinámica.....	64
<b>Figura B.27.</b> Mapeado físico de canales de señalización y datos en los enlaces DL del "backhaul" y de acceso, para un relay no transparente (Transmisión R_BS y RS síncrona).....	65
<b>Figura B.28.</b> Mapeado físico de canales de señalización y datos en los enlaces UL del "backhaul" y de acceso, para un relay no transparente (Transmisión R_BS y RS síncrona).....	66
<b>Figura B.29.</b> Temporización para el enlace descendente en el modo FDD.....	67
<b>Figura B.30.</b> Temporización para el enlace ascendente en el modo FDD.....	67
<b>Figura B.31.</b> Relay transparente. HARQ en modo cooperativo para reTx en el DL.....	69
<b>Figura B.32.</b> Relay transparente. HARQ en modo cooperativo para reTx en el UL.....	70
<b>Figura B.33.</b> Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2.....	71
<b>Figura B.34.</b> Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2, recuperación de error en la decodificación del paquete original.....	71
<b>Figura B.35.</b> Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2, recuperación de error en la decodificación del paquete original.....	71
<b>Figura B.36.</b> Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2, recuperación de error en la retransmisión.....	72
<b>Figura B.37.</b> Relay transparente. HARQ en modo cooperativo para 1ª Tx y posteriores reTx en el DL.....	73
<b>Figura B.38.</b> Mapeado físico de canales de señalización y datos en los enlaces "backhaul" y de acceso, para un relay no transparente.....	74
<b>Figura B.39.</b> HARQ síncrono/no adaptativo, nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Transporte agregado en el backhaul. Enlace DL.....	77
<b>Figura B.40.</b> HARQ síncrono/ adaptativo, nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Transporte agregado en el backhaul. Enlace DL.....	77
<b>Figura B.41.</b> HARQ síncrono/no adaptativo, nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Transporte no agregado en el backhaul. Enlace DL.....	78
<b>Figura B.42.</b> HARQ extremo a extremo para relay no transparente con scheduling centralizado. Enlace DL.....	78
<b>Figura B.43.</b> HARQ síncrono/ adaptativo nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Enlace UL.....	79
<b>Figura B.44.</b> HARQ síncrono/no-adaptativo nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Enlace UL.....	79
<b>Figura B.45.</b> Ejemplo de modo de funcionamiento HARQ síncrono en relay no transparente y scheduling distribuido en el DL.....	80

<b>Figura B.46.</b> Ejemplo de modo de funcionamiento HARQ síncrono en relay no transparente y scheduling distribuido en el UL.....	81
<b>Figura C.1.</b> Estructura de la celda simulada.....	85
<b>Figura D.1.</b> SINR obtenida en PF7 despliegue 1, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	89
<b>Figura D.2.</b> SINR obtenida en PF7 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	90
<b>Figura D.3.</b> SINR obtenida en PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	90
<b>Figura D.4.</b> SINR obtenida en PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	90
<b>Figura D.5.</b> SINR obtenida en PF3, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	91

## Índice de Tablas

---

<b>Tabla 3.1.</b> Resultados obtenidos para el método PF7, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	19
<b>Tabla 3.2.</b> Resultados obtenidos para método PF7 despliegue "flexible", MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ ....	20
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	20
<b>Tabla 3.4.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	20
<b>Tabla 3.5.</b> Resultados obtenidos para el método PF3, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	21
<b>Tabla 3.6.</b> Resultados obtenidos para el método PF7, MCS adaptativa.....	23
<b>Tabla 3.7.</b> Resultados obtenidos para el método PF7 despliegue "flexible", MCS adaptativa.....	24
<b>Tabla 3.8.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 1, MCS adaptativa.....	24
<b>Tabla 3.9.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS adaptativa.....	24
<b>Tabla 3.10.</b> Resultados obtenidos para el método PF3, MCS adaptativa.....	24
<b>Tabla 3.11.</b> Resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los métodos analizados...	26
<b>Tabla 3.12.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex.....	27
<b>Tabla 3.13.</b> Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex.....	29
<b>Tabla 3.14.</b> Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex con reserva de recursos para el enlace backhaul.....	30
<b>Tabla 3.15.</b> Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex descontando overread para el enlace backhaul.....	31
<b>Tabla 3.16.</b> Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS adaptativa, relays half-duplex.....	31
<b>Tabla 3.17.</b> Sistema de comunicaciones móviles en modo infraestructura estándar, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ y MCS adaptativa.....	32
<b>Tabla 3.18.</b> Resumen de los resultados obtenidos en el algoritmo propuesto y en un sistema de comunicaciones móviles en modo infraestructura estándar.....	32
<b>Tabla A.1.</b> Clasificación de los diferentes tipos de relay.....	48
<b>Tabla B.1.</b> Variables temporales asociadas al proceso de retransmisión.....	68
<b>Tabla B.2.</b> Tiempos de procesamiento requeridos para HARQ=6,7,8 ms.....	68
<b>Tabla C.1.</b> Parámetros generales de las simulaciones.....	85
<b>Tabla C.2.</b> Parámetros dependientes del scheduling y del servicio.....	86
<b>Tabla C.3.</b> Parámetros del modelo de CQIs.....	86
<b>Tabla C.4.</b> Modelos de propagación multicamino.....	86
<b>Tabla C.5.</b> SINR umbral y tasa de datos para cada MCS.....	86

<b>Tabla D.1.</b> Resultados obtenidos para el método PF7, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	87
<b>Tabla D.2.</b> Resultados obtenidos para el método PF7 despliegue "flexible", MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .	88
<b>Tabla D.3.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	88
<b>Tabla D.4.</b> Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	88
<b>Tabla D.5.</b> Resultados obtenidos para el método PF3, MCS fija 16-QAM $\frac{1}{2}$ .....	89

## Referencias

- [1] <http://3g4g.blogspot.com/2007/06/ofdm-and-ofdma-difference.html>
- [2] <http://www.3gpp.org/LTE>
- [3] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, "Fundamentals of WiMAX", Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series", Prentice Hall, 2007.
- [4] 3GPP TSG RAN WG1#42 R1-050764, "Inter-cell Interference Handling for E-UTRA", Ericsson, Agosto-Septiembre 2005.
- [5] 3GPP, TSG RAN WG1 LTE Ad Hoc R1-061889, "Downlink Interference Coordination", Siemens, Junio 2006.
- [6] R. Pabst, B.H. Walke, D.C. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, S. Mukherjee, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D.D. Falconer, and G.P. Fettweis, "Relay-Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Cellular Radio", submitted IEEE Communications Magazine, Sept. 2003, revised Feb. 2004.
- [7] Xue Jun Li, Boon-Chong Seet, Peter Han Joo Chong, "Multihop cellular networks: Technology and economics", Computer Networks 52 (2008), 1825–1837.
- [8] Steven W.Peters, Ali Y.Panah, Kien T.Truong, Robert W.Heath Jr., "Relay Architecture for 3GPP LTE-Advanced", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Hindawi Publishing Corporation, Volume 2009.
- [9] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094518, "Type 1 definition and inband/outband", Panasonic, LG Electronics, Samsung, Ericsson, Noviembre 2009.
- [10] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #59 R1-094518, "Type 1 definition and inband/outband", Panasonic, LG Electronics, Samsung, Ericsson, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [11] TSG RAN WG1#56bis R1-091423, "Comparison of Type 1 Relay and L2 Cooperative Relay", ZTE, Seoul, Korea, Marzo 2009.
- [12] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094477, "Clarification on the definition of Type 1 relay", LG Electronics, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [13] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094461, "DL Performance Evaluation of Type-II Relay", Research In Motion, UK Limited, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [14] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094466, "Performance Analysis and DL/UL Transmission Schemes for Type-II Relay", Research In Motion, UK Limited, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [15] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-095075, "Performance Evaluation for Type I and Type II Relay", Alcatel-Lucent Shanghai Bell, Alcatel-Lucent, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [16] Yong Liu, Chiu Ngo, "Radio Resource Allocation for Relay Enhanced Cellular Systems", Proceedings of the 6th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking Conference, Pag: 892-897, Las Vegas, NV, USA, 2009.
- [17] Liping Wang, Yusheng Ji, Fuqiang Liu, Jie Li, "Performance Improvement through Relay-Channel Partitioning and Reuse in OFDMA Multihop Cellular Networks", Proc. IWCMC 2008, Agosto 2008, pp. 177-182

- [18] Won-Hyoung Park, Saewoong Bahk, "Resource Management Policies for Fixed Relays in Cellular Networks", *Computer Communications* Volume 32, Issue 4, 4 March 2009, Pages 703-711
- [19] Özgür Oyman, "Opportunistic Scheduling and Spectrum Reuse in Relay-based Cellular OFDMA Networks", *IEEE Communications Society GLOBECOM 2007*.
- [20] 3GPP TR 36.814, "Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects", Release 9, Marzo 2010.
- [21] Emanuel B. Rodrigues, Fernando Casadevall, Pawel Sroka, Marco Moretti and Giulio Dainelli, "Resource Allocation and Packet Scheduling in OFDMA-Based Cellular Networks", *IEEE proceedings of the 4th International Conference on Crowncom, 2009*.
- [22] Ángela Hernández, Israel Guío, Antonio Valdovinos, "Downlink Scheduling for Intercell Interference Fluctuation Mitigation in Partial-Loaded Broadband Cellular OFDMA Systems", *Ultra Modern Telecommunications & Workshops, 2009. ICUMT '09. International Conference on St. Petersburg*.
- [23] David Gesbert, Saad Ghazanfar Kiani, Anders Gjendemsjo, Geir Egil Oien, "Adaptation, Coordination, and Distributed Resource Allocation in Interference-Limited Wireless Networks", *PROCEEDINGS- IEEE VOL 95; N. 12, pag. 2393-2409, 2007*.
- [24] Long Le, Ekram Hossain, "Multihop Cellular Networks: Potential Gains, Research Challenges, and a Resource Allocation Framework", *IEEE Communications Magazine, Septiembre 2007*.
- [25] Fan Huang, Yafeng Wang, Zhuo Wang, Min Liang, Dacheng Yang, "Distributed and Centralized Scheduling for Relaying Systems under Interference Limited Conditions", *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly, SESSION: Next generation mobile networks II, Pag.1269-1273, Leipzig (Alemania), 2009*.
- [26] Kan Zheng, Bin Fan, Zhangchao Ma, Guangyi Liu, Xiaodong Shen, Wenbo Wang, "Multihop Cellular Networks Toward LTE-Advanced", *IEEE Vehicular Technology Magazine, Septiembre 2009*.
- [27] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094562, "Design of Relay Backhaul Control Channels in LTE-A", *CATT, Jeju, Korea, Noviembre 2009*.
- [28] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094453, "Control Channel Design for Relay Backhaul Link in FDM+TDM Scheme", *LG-Nortel, Jeju, Korea, Noviembre 2009*.
- [29] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094489, "UL/DL timing and guard periods in backhaul subframes", *ETRI, Jeju, Korea, Noviembre 2009*.
- [30] 3GPP TSG RAN WG1#54bis R1-083676, "Discussion on the TD relay and FD relay for FDD system", *Panasonic, Praga, República Checa, Octubre 2008*.
- [31] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094514, "RN DL/UL subframe timing of backhaul and access link", *Panasonic, Jeju, Korea, Noviembre 2009*.
- [32] 3GPP RAN WG1#54bis R1-084054, "Support of Rel-8 UEs by LTE-A Relays", *Qualcomm Europe, Praga, República Checa, Octubre 2008*.
- [33] 3GPP TSG RAN WG1#57 R1-091937, "Frame Structure and Signaling to Support Relay Operation", *Motorola, San Francisco, USA, Mayo 2009*.
- [34] 3GPP TSG RAN WG1#57 R1-091763, "Control Channel for relay Backhaul Link", *Nokia Siemens networks, Nokia, Mayo 2009*.
- [35] 3GPP TSG RAN WG1#57 R1-091783, "Relay Link Control Signalling", *Research in Motion, UK Limited, San Francisco, USA, Mayo 2009*.
- [36] 3GPP TSG RAN WG1#57 R1-092115, "Resource Allocation and Downlink Control Channel Structure for Relay Backhaul Link", *LG Electronics, San Francisco, USA Mayo 2009*.

- [37] 3GPP TSG RAN WG1#57 R1-091767, "Improved Access-backhaul partition Scheme for TDD Relay", Nokia, Nokia Siemens Networks, San Francisco, USA, Mayo 2009.



# *Abreviaturas y Acrónimos*

---

3GPP	↔	Third (3 <sup>rd</sup> ) Generation Partnership Project
ACK	↔	Acknowledgment
AF	↔	Amplify and Forward
AMC	↔	Adaptive Modulation and Coding
AR-PCFICH	↔	Acceso Relay Physical Control Format Indicator Channel
AR-PDCCH	↔	Acceso Relay Physical Downlink Control Channel
AR-PDSCH	↔	Acceso Relay Physical Downlink Shared Channel
AR-PHICH	↔	Acceso Relay Physical Channel
AR-PUCCH	↔	Acceso Relay Physical Uplink Control Channel
AR-PUSCH	↔	Acceso Relay Physical Uplink Shared Channel
ARQ	↔	Automatic Report Request
BCH	↔	Broadcast Channel
BER	↔	Bit Error Rate
BLER	↔	Block Error Rate
CCH	↔	Control Channel
CQI	↔	Channel Quality Indicator
DF	↔	Decode and Forward
DL	↔	Downlink
FD	↔	Frequency Division
FDD	↔	Frequency Division Duplex
FDM	↔	Frequency Division Multiplex
FEC	↔	Forward Error Correction
FFR	↔	Fractional Frequency Reuse
FFT	↔	Fast Fourier Transform
FRF	↔	Fractional Reuse Factor

HARQ	↔	Hybrid Automatic Report Request
ID	↔	Identity
IEEE	↔	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IFFT	↔	Inverse Fast Fourier Transform
IP	↔	Internet Protocol
L1	↔	Layer 1
L2	↔	Layer 2
L3	↔	Layer 3
LOS	↔	Line of Sight
LTE	↔	Long Term Evolution
MAC	↔	Medium Access Control
MBSFN	↔	Multicast Broadcast Single Frequency Network
MCS	↔	Modulation and Coding Scheme
NACK	↔	Negative Acknowledgment
NLOS	↔	Non Line of Sight
OFDM	↔	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	↔	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBR	↔	Primary Backhaul Resource
PCFICH	↔	Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	↔	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	↔	Physical Downlink Shared Channel
PF	↔	Partition Factor
PF	↔	Proportional Fair
PHICH	↔	Physical Channel
PUCCH	↔	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	↔	Physical Uplink Shared Channel
QAM	↔	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	↔	Quality of Service
QPSK	↔	Quadrature Phase Shift Keying
R_BS	↔	Relay Base Station
RB	↔	Resource Block

R-DCI	↔	Relay Downlink Control Information
RF	↔	Radio Frequency
RLC	↔	Radio Link Control
R-MAC	↔	RElay Medium Access Control
R-PCFICH	↔	Relay Physical Control Format Indicator Channel
R-PDCCH	↔	Relay Physical Downlink Control Channel
R-PDSCH	↔	Relay Physical Downlink Shared Channel
R-PHICH	↔	Relay Physical Channel
R-PUCCH	↔	Relay Physical Uplink Control Channel
R-PUSCH	↔	Relay Physical Uplink Shared Channel
RRC	↔	Radio Resource Control
RRM	↔	Radio Resource Management
RS	↔	Relay Station
RSSI	↔	Received Signal Strength Indication
Rx	↔	Recepción
SBR	↔	Secondary Backhaul Resource
SDU	↔	Service Data Unit
SINR	↔	Signal to Interference and Noise ratio
SR	↔	Scheduling Request
TB	↔	Transport Block
TD	↔	Time Division
TDD	↔	Time Division Duplex
TDM	↔	Time Division Multiplex
TTI	↔	Transmission Time Interval
Tx	↔	Transmisión
UE	↔	User Equipment
UL	↔	Uplink
WiMAX	↔	Worldwide Interoperability for Microwave Access



# Introducción

*En este capítulo se describe, a modo de introducción, el marco sobre el que surge la posibilidad de implementación de un sistema de comunicaciones móviles sobre el que se añaden las estaciones relay.*

## 1.1. Introducción a los sistemas en modo Relay

Actualmente y cada vez más, las nuevas tecnologías desarrolladas en torno a las redes de comunicaciones inalámbricas de nueva generación, buscan la provisión de una alta tasa de transferencia de datos ubicua de una manera eficiente, de modo que para alcanzar este objetivo es necesario utilizar estrategias agresivas que permitan una mayor reutilización de los recursos radio. Además para que la cobertura *wireless* sea ubicua ha de proporcionarse un servicio confiable en todo el área que cubre una estación base, ya que si la capacidad se puede distribuir de manera adecuada en toda la zona de cobertura de la red, los subscriptores podrán acceder a ésta de una manera más eficiente.

En estos sistemas celulares de redes móviles de última generación se utiliza la técnica de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Multiple Access*) [1] con objeto de aprovechar determinadas características relevantes y propias de la misma para beneficio del funcionamiento del sistema, como la asignación de los recursos en bloques frecuenciales y temporales (RB: *Resource Block*), su resistencia inherente al desvanecimiento multitrayecto de carácter selectivo en frecuencia, y el aprovechamiento de la diversidad multiusuario que puede lograrse, pudiendo repartir los recursos de una manera flexible en función de las condiciones en las que se encuentran temporalmente los usuarios para maximizar la capacidad de la red. Así pues, OFDMA ha sido considerado el nuevo interfaz aire utilizado por las recientes generaciones de comunicaciones móviles (3G y futura 4G), y de hecho, existe ya una amplia variedad de tecnologías inalámbricas que hacen uso de OFDMA como LTE (*Long Term Evolution*) [2] o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [3].

Sin embargo una de las mayores problemáticas asociadas a las nuevas redes celulares, en las que se pretende utilizar, al menos, un reuso unidad a nivel de celda, de modo que todos los recursos (ancho de banda) se encuentren disponibles en cada una de las células con objeto de poder maximizar la capacidad soportada, es la asignación de recursos que puede ofrecerse a los usuarios que se encuentran en malas condiciones de canal con la estación base que les debe dar servicio. Estos usuarios necesitarían para poder recibir/transmitir con alta probabilidad de éxito, una elevada potencia que permita la demodulación de la señal con una SINR (*Signal to Noise and Interference Ratio*) adecuada, y esto a su vez derivaría en un aumento de la interferencia que se provoca sobre las celdas vecinas, que utilizan los mismos recursos.

Son muchas las propuestas que se barajan actualmente con objeto de intentar solucionar este problema, analizando y estudiando por ejemplo diferentes técnicas de coordinación de las celdas, de modo que los recursos asignados a los usuarios que se encuentran alejados de la estación base (o más genéricamente hablando, aquéllos que poseen unas malas condiciones de canal con la misma), se gestionan de modo que pertenezcan a diferentes bandas frecuenciales en las que se divide el

espectro, por lo que se reduce ligeramente la libertad del *scheduler* pero se consigue un mayor control de los recursos potencialmente interferentes (coordinación frecuencial) [4]. Existen igualmente diferentes propuestas relacionadas con la coordinación en potencia [5], que establece diferentes máscaras de potencia con las que se puede transmitir/recibir en función de la celda y de las condiciones de canal del móvil, y que pueden ser aplicadas de forma aislada o conjuntamente con las anteriormente descritas.

Otra posible solución podría ser el despliegue de un mayor número de estaciones base de menor potencia con la consecuente reducción del tamaño de las celdas y el beneficio que ello ocasiona sobre las condiciones de canal de los usuarios, aunque el coste de infraestructura y la complejidad del sistema se incrementarían drásticamente. Inspirado en este concepto de la reducción de la distancia entre los usuarios y la entidad que les debe dar servicio, con la disminución de las pérdidas de canal que ello implica, surge el concepto de los nodos relay [6]-[8], que podrían entenderse como pequeñas estaciones base con menor autonomía y de más sencilla implementación, que formarían junto con la infraestructura estándar un sistema multisalto, y para los que no es necesaria una comunicación cableada con las estaciones base ni entre ellos, sino *wireless*. De este modo, la combinación de OFDMA con técnicas de retransmisión en las que intervienen las estaciones relay permitirá la provisión de un mejor rendimiento de las redes de comunicaciones móviles, y ofrecerá una probabilidad de acceso a la red más homogénea sobre la que no influyan tan drásticamente las condiciones del usuario en un instante dado.

La introducción del modo relay en un sistema de comunicaciones móviles implica la incorporación de dos nuevos elementos de red: la R\_BS (*Relay Base Station*), que no es más que una estación base con capacidad para el soporte de comunicaciones con los UEs (*User Equipments*) a través de nodos relay, y las propias estaciones o nodos relay (RS: *Relay Station*). Asimismo, implica el soporte de dos tipos de enlaces: R\_BS  $\leftrightarrow$  RS (enlace *backhaul*), y RS  $\leftrightarrow$  UE (enlace de acceso al relay o *access*), que conviven con el enlace directo R\_BS  $\leftrightarrow$  UE (enlace de acceso macro o enlace directo). Los UEs deben tener la capacidad de establecer comunicaciones a través del relay o establecer comunicaciones directas con la infraestructura. De hecho, será frecuente la referencia de UE macro cuando éste se comunique directamente con la R\_BS, o de UE relay cuando lo haga a través del relay.

La adición en la infraestructura de un sistema de comunicaciones móviles de estaciones relay deriva en la necesidad de diseñar nuevos algoritmos de gestión de recursos radio (RRM, *Radio Resource Management*) que permitan maximizar la capacidad del canal o minimizar los efectos adversos derivados de la inclusión de dichas entidades, como la sobrecarga de señalización (*overhead*) consecuente de un mayor número de transmisiones necesarias para el soporte de las comunicaciones en sistemas multisalto (Figura 1.1 ).

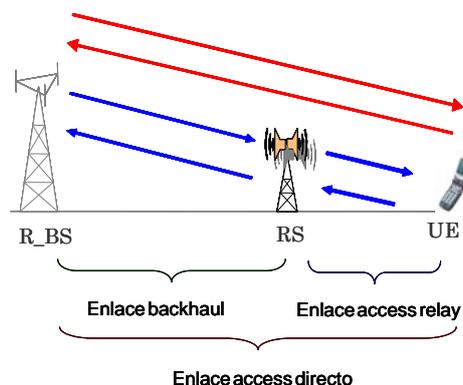


Figura 1.1 . Enlaces soportados en un sistema de comunicaciones móviles en modo relay

La búsqueda de nuevas propuestas de gestión de recursos radio para el soporte de los nuevos enlaces añadidos ha de permitir una mayor reutilización de los recursos de la red, de modo que el gasto de los mismos, necesario para la señalización extra y para las transmisiones en dos fases, se vea compensado, y el número de subscriptores que pueden recibir servicio en un instante temporal

no se vea reducido por el hecho de utilizar el soporte auxiliar de las entidades relay. Sin embargo la reutilización de los mismos recursos supone un aumento de la interferencia a nivel de celda y entre las celdas vecinas de la red que puede suponer un problema en el correcto funcionamiento del sistema. En líneas generales, es fácil identificar los siguientes escenarios de interferencia:

- Interferencia de las transmisiones de la R\_BS sobre UEs servidos por un RS.
- Interferencia de las transmisiones de un RS sobre los UE servicios por la R\_BS.
- Interferencia de las transmisiones de un RS sobre los UEs servidos por otros RSs.
- Auto-interferencia en el caso de relays con doble cadena de RF (*Radio-Frequency*) (para transmisión y recepción) en la misma banda frecuencial.

Las soluciones para evitar la interferencia pueden estudiarse desde dos puntos de vista, aunque básicamente el concepto decisivo para el control de la misma es la utilización de recursos ortogonales (diferentes RBs) en los enlaces potencialmente más interferentes.

- Mediante partición de recursos entre las transmisiones de la R\_BS y del RS, lo que implica que en determinadas circunstancias se produce una infrautilización de los recursos frecuenciales.
- Mediante utilización de información dinámica de los niveles de interferencia soportados en los distintos recursos frecuenciales para asignar dinámicamente recursos de forma que los enlaces interferentes sean ortogonales. Este tipo de gestión implica conocer para cada UE los enlaces más interferentes, con la consiguiente clasificación de los mismos.

De este modo, para todos aquellos móviles que se encuentran en buenas condiciones, no sería necesario ni recomendable el empleo de nodos relay para el establecimiento de la comunicación, ya que la utilización de los mismos implica un retardo en la transmisión, un gasto extra de recursos para soportar el nuevo enlace, y una adecuada gestión de los mismos para evitar un excesivo aumento de interferencia, mientras que para aquellos usuarios para los que resulta complicada una buena comunicación con la estación base, podrá ser interesante que la transmisión se realice en dos fases, gracias al soporte auxiliar de dichas estaciones relay, siempre que se consiga un compromiso entre las ventajas que se obtienen de la utilización de los mismos (mayor posibilidad de los usuarios de acceder a la red independientemente de su canal con la estación base) y los problemas que se acarrearán.

Por ello y sobre esta línea de investigación de partición de recursos ortogonales entre los enlaces potencialmente más interferentes, el objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el análisis y propuesta de diferentes esquemas de Gestión de Recursos Radio que permitan un adecuado compromiso entre la capacidad de suscriptores soportados y la calidad de las comunicaciones a las que se ofrece servicio, evaluando el impacto que cada método supone en la red.



# RRM en modo Relay

*En este capítulo se analizan, de manera teórica, diferentes propuestas de Gestión de Recursos Radio en modo Relay encontradas en la literatura.*

## 2.1. RRM en modo Relay, análisis teórico

Cómo realizar la gestión de recursos radio (RRM) en un entorno tan complejo como el de una red de comunicaciones móviles sobre la que se van a utilizar de manera auxiliar, para los casos en los que una comunicación directa con la estación base no ofrezca una alta probabilidad de éxito, las estaciones relay, no se vislumbra con claridad a primera vista ni ofrece una solución trivial. Sin embargo, existe un consenso sobre la necesidad de diseñar algoritmos inteligentes RRM de alta eficiencia en ancho de banda que puedan sacar pleno provecho al potencial de este tipo de redes.

La intención global es la de mejorar el *throughput* o capacidad del sistema, en el que influyen factores como el de garantizar la equidad entre estaciones subscriptoras o la consideración de diferentes clases de servicio, y permitir una cobertura homogénea de modo que los usuarios puedan recibir un servicio adecuado y no se vean limitados por sus condiciones respecto a la estación base.

En el escenario evaluado en este Trabajo Fin de Máster únicamente se contempla la posibilidad de que los usuarios, o bien reciban un servicio directo a través de la estación base, o bien lo hagan a través de un relay, pero nunca se permite que la comunicación entre R\_BS y UE se realice en un número mayor de saltos. Así pues en este sentido, los terminales móviles pueden utilizar la estación relay como nodo intermedio para alcanzar a la estación base, pero no es posible establecer comunicaciones entre terminales móviles utilizando exclusivamente el nodo relay sin intervención de una estación base, ni se contempla la posibilidad de establecer comunicaciones con más de dos saltos, es decir, que impliquen en la comunicación entre el terminal móvil y la estación base dos o más enlaces entre nodos relay. En realidad, los sistemas relay multisalto, cuyo esquema genérico se ilustra en la Figura 2.1 , admiten la comunicación a través de más de un nodo relay, aunque los beneficios de dicha consideración son dudosos en cuanto a retardo y gasto de recursos necesarios para el soporte de los múltiples enlaces.

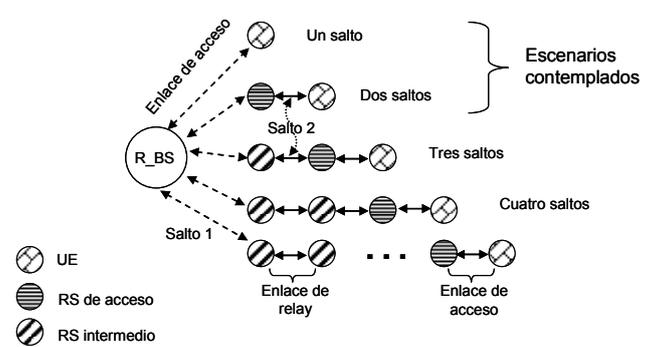


Figura 2.1 . Estructura básica de un sistema multisalto con relays

Además en la infraestructura objeto de análisis los nodos relay se consideran únicamente como entidades fijas, de modo que se pueden preplanificar y diseñar detalladamente, lo que implica que la calidad del canal *backhaul* (exceptuando aspectos relativos a gestión de interferencias) es buena. Esto no excluye que las localizaciones puedan, además de en condiciones de canal con visión directa entre R\_BS y RS, planificarse también en condiciones de visión no directa entre ambas. Por último debe tenerse en cuenta que el nodo relay debe operar en la misma banda frecuencial que las comunicaciones directas entre R\_BS y UE, con objeto de ahorrar espectro. De ahí la necesidad de la gestión de nuevas técnicas que mantengan cierto control de la interferencia.

De los aspectos analizados en cuanto a las implicaciones generales derivadas de la adición de estaciones relay en un sistema de comunicaciones móviles, incluidas en los anexos correspondientes (análisis efectuado en el Anexo A y Anexo B), se concluye que se van a considerar para su estudio principalmente dos tipos de relays (Tipo 1 y Tipo 2) asociados fundamentalmente a dos modos de funcionamiento diferentes [9]-[15]. Los relays de Tipo 1 son generalmente relays de tipo no transparente (relays que funcionan a efectos prácticos como una estación base autónoma, poseen su propia identidad de celda con capacidad de crear una célula independiente, y con capacidad de transmitir la señalización necesaria para la comunicación con los móviles a los que van a servir, plenamente conscientes de que van a recibir su información a través de ellos), y soportan tanto *scheduling* centralizado en la estación base como distribuido en las propias estaciones relay. En este tipo de relays se asume que, a parte de poder ser utilizados para mejorar las condiciones a nivel de celda, un escenario de aplicación óptimo es la extensión de cobertura, y por tanto, es razonable pensar en escenarios en los que el UE pueda estar bajo la cobertura del relay pero no de la estación base (Figura 2.2).

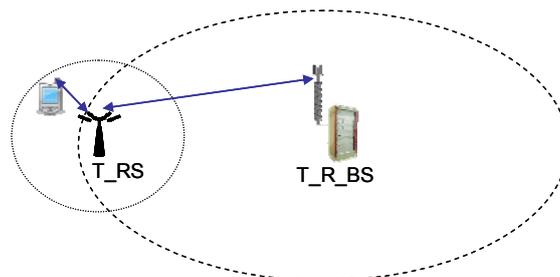


Figura 2.2 . Modo de funcionamiento no-transparente

Por el contrario en los relays de Tipo 2, relays de tipo transparente (sirven de soporte para la transmisión de datos a los usuarios en malas condiciones pero sin capacidad de gestionar señalización ni otras actividades dedicadas a la estación base, los usuarios no deben sufrir ningún impacto respecto a la comunicación directa con la estación base y no son conscientes del modo en que van a recibir servicio), el objetivo es disponer de un dispositivo de bajo coste que permita aumentar la capacidad global en la zona de cobertura de la R\_BS, y no tanto la tasa de transmisión de una comunicación concreta. Así el relay dispone del mismo identificador de celda que la R\_BS (no puede crear nuevas celdas), lo que permite que el UE conmute la comunicación del RS a la R\_BS sin necesidad de efectuar un *handover*. La comunicación de los UEs con la R\_BS a través de este tipo de relays es transparente para los UEs, lo que implica que éstos no son conscientes de si se están comunicando con la red a través del RS o directamente a través de la R\_BS. Sólo soporta *scheduling* centralizado en la R\_BS, puesto que el RS no puede generar su propia señalización de control indicando los recursos asignados para cada UE. Así pues, su principal aplicación radica en aumentar el *throughput* cuando el UE está situado dentro del área de cobertura de la R\_BS, es decir, es útil en escenarios en los que el UE es capaz de recibir la información de control de la R\_BS, puesto que esta información se envía a una tasa de transmisión reducida y con alta codificación de canal, pero no puede recibir directamente datos de usuario con altas tasas de transmisión. Por tanto, todos los UEs y RSs dentro de la zona de cobertura de la R\_BS están sincronizados con ésta y deben obtener la información de control (sincronización, selección adaptativa de MCS –*Modulation and Coding Scheme*-, subportadoras y potencia, asignación de recursos en DL-*DownLink*- y UL-*UpLink*-) directamente de ella. En la Figura 2.3 se muestra un escenario en el que el RS opera en modo de funcionamiento transparente.

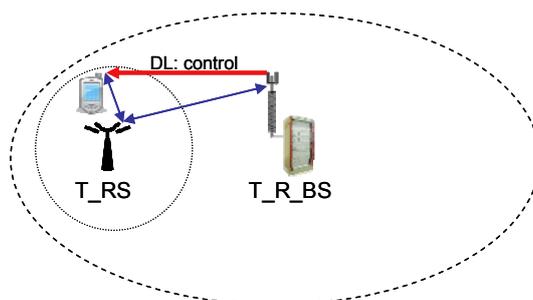


Figura 2.3 . Modo de funcionamiento transparente

Tras analizar comparativa y brevemente los diferentes tipos de relays que pueden implementarse, más detallados en el Anexo A, así como los diferentes modos de funcionamiento que permiten los mismos, y el impacto, fundamentalmente a nivel de señalización (análisis efectuado en el Anexo B) que supone su inclusión en la red, se decide que el tipo de relays utilizados en este Trabajo Fin de Máster será aquél que permita el mantenimiento de la estructura de trama MAC (*Medium Access Control*) de la infraestructura estándar, en concreto en el enlace descendente y con un duplexado FDD (*Frequency Division Duplex*) entre los enlaces DL y UL, y aquél que permita para el escenario de estudio planteado la posibilidad de que los usuarios reciban de la manera más eficiente toda la información del relay, es decir, los relays de Tipo 1.

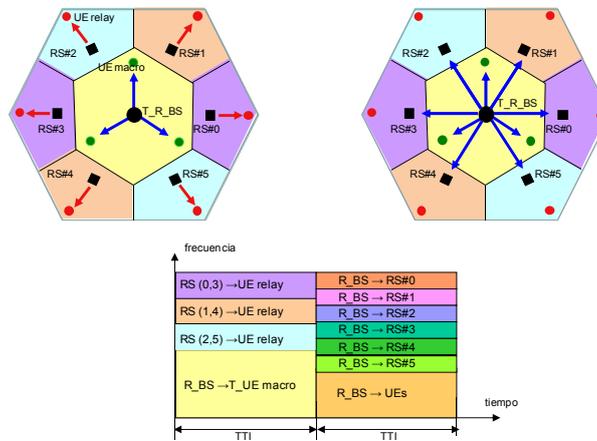
Las comunicaciones entre el enlace *backhaul* y el enlace de acceso al relay se efectuarán multiplexadas en tiempo de modo que la transmisión entre R\_BS y RS y la transmisión entre RS y UEs relay se produzca en diferentes instantes temporales (TTI: *Transmission Time Interval*). La comunicación entre R\_BS y UEs macro estará, como en el caso de funcionamiento estándar, permitida en todas las subtramas.

La ubicación de las estaciones relay dentro de la arquitectura de la celda es variable en función de las necesidades que pretendan cubrirse con la inclusión de las mismas. En este Trabajo Fin de Máster se planifica un total de seis nodos relay en cada celda, situados en la línea que une la estación base con cada uno de los vértices de la celda (celdas hexagonales) a una determinada distancia ( $2/3$  del radio de la celda para las simulaciones), de manera que se proporcione servicio a los usuarios localizados en los bordes, y que potencialmente podrían encontrarse en una situación complicada de comunicación directa con la estación base.

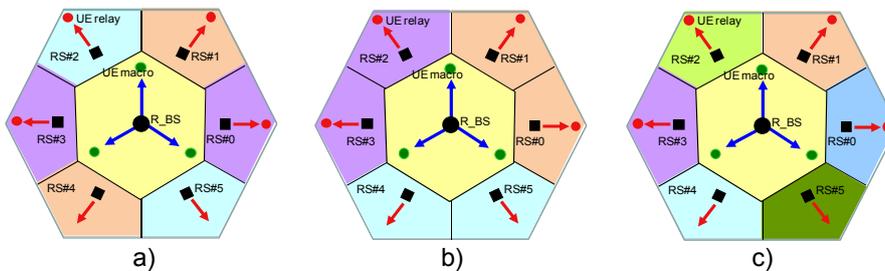
Tanto en el caso de considerar multiplexación temporal (TD: *Time Division*) como frecuencial (FD: *Frequency Division*) de los enlaces *backhaul* y acceso al relay, hay que tener en cuenta que para evitar la autointerferencia, el RS no debe transmitir y recibir simultáneamente sobre el mismo recurso frecuencial, por lo que se requiere algún tipo de coordinación temporal o frecuencial en las asignaciones de recursos en el *backhaul* y enlace de acceso al relay. Por otra parte, aunque, a priori, la cantidad de recursos (RBs) necesarios para comunicarse con un UE conectado a un relay es proporcional al número de saltos, ya que se requiere la aplicación de esquemas de coordinación frecuencial entre las transmisiones macro y acceso relay (lo que conlleva el uso de recursos frecuenciales diferentes) para evitar la interferencia, es posible contemplar algunas estrategias de mejora en el uso de los recursos.

Con todo ello el principal aspecto a tener en cuenta y que debe ser analizado en la Gestión de Recursos Radio, es la nueva planificación de RBs y esquema de reutilización de los mismos, de modo que el hecho de introducir nuevos enlaces en las comunicaciones de la red, con el consecuente gasto extra de recursos que esto implica, no suponga una infrautilización en términos de capacidad. Para ello se deben buscar técnicas de reutilización más agresivas que el reuso unidad a nivel de celda de tal manera que se permita un mayor aprovechamiento del espectro disponible, y controlando por otro lado que la interferencia extra que se produce del mayor reuso no suponga un perjuicio en el comportamiento de la red [16]. El mismo número de recursos de que se dispone en un sistema de comunicaciones estándar ha de servir, en modo relay, para las comunicaciones en todos los enlaces que ahora existen en la red (Figura 2.4), por lo que han de investigarse diferentes algoritmos de reutilización del espectro (Figura 2.5). En cualquier caso, las R\_BS deben coordinar el tamaño de las particiones de recursos reservadas a los respectivos relays bajo su dominio considerando no sólo el

volumen de tráfico que éstos soportan, sino también el efecto sobre la interferencia. El ajuste de dichas particiones es transparente para los RS, que únicamente reciben indicaciones sobre los recursos que las R\_BS les preasignan.



**Figura 2.4 .** Ejemplo de esquema de partición de recursos para un despliegue de 6 RS por R\_BS. Se asume multiplexado TD entre el backhaul y el enlace de acceso al relay [16]



**Figura 2.5 .** Ejemplos de distintas opciones de partición de recursos para las transmisiones de R\_BS y RS [16]

A continuación se van a describir algunas de las propuestas más relevantes encontradas en la literatura y que posteriormente serán analizadas y modificadas con objeto de establecer cuál de ellas ofrece un mejor grado de compromiso entre la capacidad soportada y la interferencia que se provoca sobre los usuarios, o lo que es lo mismo, las características de recepción que los subscriptores pueden obtener.

La primera técnica y más sencilla de todas ellas es aquella que consiste en una partición de los recursos en tantas bandas frecuenciales diferentes como entidades distintas se implementan en la celda para dar servicio a los usuarios [17]. Así pues, en el caso que se analiza, el espectro total se encontraría dividido en siete zonas de recursos frecuenciales ortogonales, una de ellas dedicada a la transmisión por parte de la estación base (para el enlace directo y el *backhaul*), y cada una de las seis restantes para las transmisiones entre cada uno de los seis relays y los usuarios a los que éstos darán servicio. De ahí que el algoritmo reciba la nomenclatura de **PF7** (*Partition Factor 7*). A priori ya puede preverse que este método, si bien no va a suponer ningún aumento de interferencia, pues no se reutilizan los mismos recursos dentro de la propia celda, va a derivar en un decremento de la capacidad de usuarios soportados en la red, pues el mismo número de recursos deberá, en este caso, servir para las comunicaciones directas y para las comunicaciones en dos fases, que van a requerir un gasto extra de recursos, pues en estas comunicaciones en las que los relays sirven de soporte auxiliar, los datos deben transmitirse en una primera fase entre R\_BS y RS y en segunda instancia entre RS y UE. Por ello, en comparación con un sistema de comunicaciones móviles operando en modo infraestructura estándar, se obtendrá un menor número de usuarios soportados en la red con la infrautilización del sistema que ello significa. En la Figura 2.6 puede observarse el despliegue PF7, donde cada color representa una subbanda del total del espectro frecuencial disponible. Al utilizar cada entidad unos recursos diferentes, la interferencia se va a mantener controlada y estable dentro de la red.

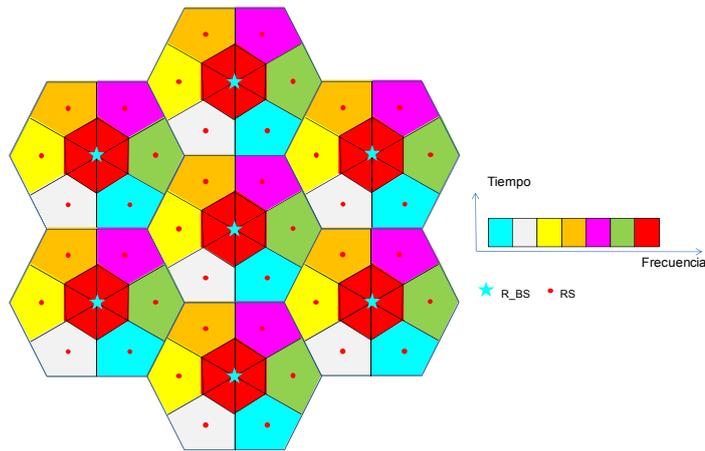


Figura 2.6 . Algoritmo de reuso frecuencial PF7

Si se plantea la posibilidad de que varios relays dentro de la propia celda utilicen para sus comunicaciones la misma banda frecuencial, se produce un aumento de interferencia, tanto intra-celular como inter-celular, pero se posibilita el hecho de poseer un esquema de reutilización de recursos más agresivo que permita, que al menos el mismo número de subscriptores que en un sistema estándar, reciban servicio y lo hagan en condiciones más homogéneas [17]-[19]. Así por ejemplo se proponen los algoritmos **PF4**, de modo que dos de los relays de la celda empleen los mismos recursos (se requieren en total 4 bandas de frecuencias diferentes en la celda), y el **PF3**, en el que tres de los relays (relays alternos) de cada celda trabajarán en la misma banda frecuencial. De este modo se establecen en la celda un total de cuatro bandas diferentes para el primero de los métodos (una banda para la R\_BS y las tres restantes para cada pareja de relays que reutilizan la misma subbanda), y un total de tres bandas frecuenciales para el segundo de los algoritmos (una de ellas dedicada a R\_BS y las otras dos para cada trío de relays no adyacentes de la celda que van a transmitir en el mismo espectro). Evidentemente el algoritmo PF3 presentará mayores problemas de interferencia a la par que ofrezca la posibilidad de que un número mayor de usuarios sea servido en la red de manera simultánea, la cuestión será estudiar en qué punto el compromiso entre ambos factores resulta más adecuado.

A continuación se representa en la Figura 2.7 dos variantes diferentes del algoritmo PF4. En la primera de ellas son los relays contiguos los que van a utilizar la misma banda frecuencial con objeto de analizar el impacto a nivel de interferencia y flexibilidad de asignación que implica en la propia celda, y en el segundo de los despliegues son los relays ubicados en vértices opuestos los que trabajarán sobre el mismo espectro.

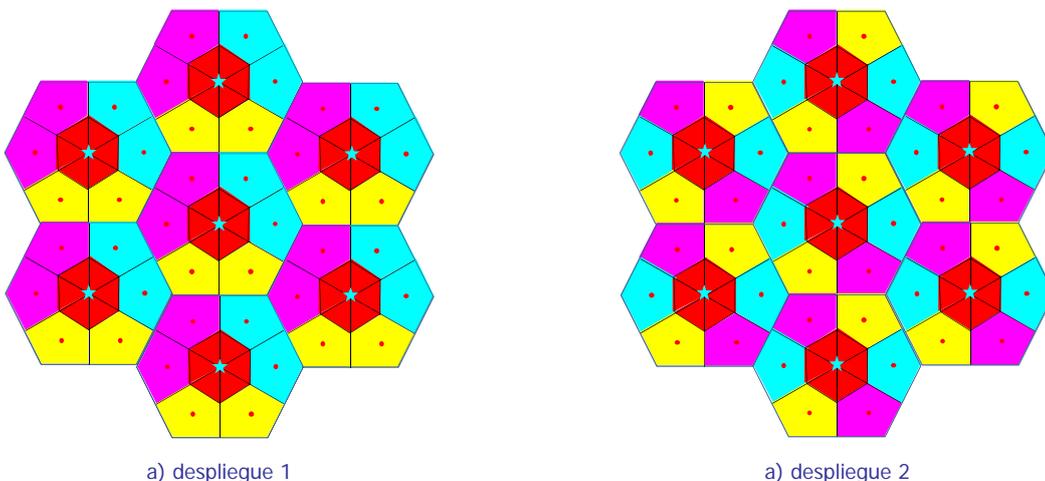


Figura 2.7 . Ejemplos de algoritmo de reuso frecuencial PF4

Cada una de las propuestas recogidas en la Figura 2.7 dará un patrón de interferencia diferente, pues si en la primera de ellas los relays adyacentes utilizando la misma banda frecuencial pueden

suponer un problema dentro de la propia celda, en la segunda, el mayor problema de interferencia vendrá de las celdas adyacentes, entre las cuales pueden existir usuarios cercanos, geográficamente hablando, que reciban los mismos recursos.

Si en el algoritmo PF4 los relays que trabajan en la misma banda frecuencial son los que se encuentran en posiciones adyacentes en la celda, imponiendo que una vez que uno de ellos utiliza un recurso quede automáticamente descartado para ser utilizado por el otro en el mismo instante temporal, se obtiene una variante del método PF7 sólo que con una mayor flexibilidad de asignación de los recursos (algoritmo denominado PF7-flexible o segundo de los despliegues de PF7 para su posterior análisis).

En la Figura 2.8 se observa el despliegue del algoritmo PF3 que presenta zonas críticas de reutilización de recursos entre celdas vecinas que supondrá un problema de interferencia.

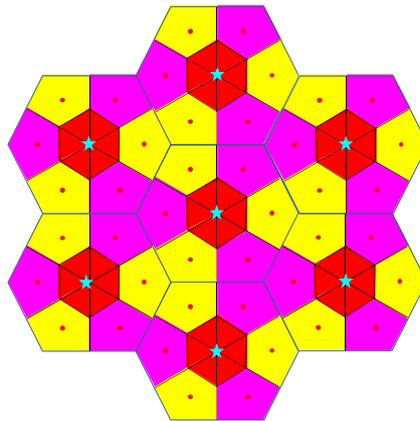


Figura 2.8 . Algoritmo de reuso frecuencial PF3

Antes de proceder al análisis experimental de cada uno de los métodos de Gestión de Recursos Radio en modo relay se va a realizar, de manera teórica, un estudio de la repartición de recursos que se ha de efectuar en una comunicación en dos saltos para observar el gasto extra de los mismos que la adición de nodos relay implica.

Como se explica en el anexo correspondiente (Anexo A), existen relays que poseen varias cadenas radio y que por tanto son capaces de transmitir y recibir simultáneamente (*full-duplex*), y existen por el contrario relays que únicamente constan de un transceptor (*half-duplex*) y que por tanto, o bien operan en modo transmisión, o bien lo hacen en modo recepción.

El análisis que se va a realizar a continuación se basa en el tipo de relays *half-duplex*, por lo que la comunicación entre la R\_BS y el RS se realizará en un instante temporal (TTI) y la comunicación en el enlace de acceso al relay entre RS y los UEs a los que debe dar servicio se realizará en un TTI diferente. En el Anexo B puede observarse igualmente como la información en el primero de los casos, en el enlace *backhaul*, se mapea sobre unas subtramas conocidas como subtramas "blancas", y la información que se manda en el segundo de los enlaces se mapea sobre subtramas *unicast* de comunicación estándar. Ambas subtramas soportan compatibilidad con el formato de la trama estándar en la que se mapean los recursos para las comunicaciones directas entre la estación base y los usuarios macro. Es por ello que, de las subtramas anteriores, parte de los recursos serán dedicados a las comunicaciones con los UEs macro, que podrán establecerse tanto en las subtramas blancas como en las subtramas estándar, y parte de los recursos serán dedicados para la comunicación a través de los relays, que deberán reservar RBs, para una única comunicación, en ambas subtramas.

Así pues la comunicación entre R\_BS y UEs relay se producirá en dos fases, y la capacidad que podrá obtenerse en dicha comunicación ( $C_{e2e}$ ) responderá a la siguiente expresión:

$$C_{e2e} = \left( \frac{1}{C_{backhaul}} + \frac{1}{C_{acceso\_relay}} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

siendo  $C_{backhaul}$  la capacidad que puede obtenerse en el enlace *backhaul* y  $C_{acceso\_relay}$  la que puede lograrse en el enlace entre relay y UE. Para ello se ha considerado a priori que el *throughput* en los dos enlaces va a ser el mismo, aunque esto es una suposición que no tiene por qué cumplirse siempre, ya que el *throughput* que puede lograrse en cada enlace dependerá de la SINR y con ello de la modulación que pueda emplearse para una transmisión eficiente, que puede ser diferente en cada uno de los enlaces. Sin embargo, para que ninguna de las dos fases de la comunicación suponga un cuello de botella y reduzca la tasa que puede enviarse de forma efectiva entre R\_BS y UE, será conveniente que la cantidad de datos que se transmita en cada uno de los enlaces sea la misma, aunque para ello dependiendo de las condiciones del canal de los mismos, pueda variar el número de recursos necesarios para dicha transmisión en cada enlace. Así pues a priori, se considera que la capacidad en ambos enlaces será la misma. De este modo, la cantidad de recursos necesarios para una comunicación en la que interviene de manera auxiliar un nodo relay ( $NRB_{total\_relay}$ ) será la suma de los recursos necesarios para el enlace *backhaul* ( $NRB_{backhaul}$ ) y de los recursos necesarios para el enlace *access* ( $NRB_{acceso\_relay}$ ).

$$NRB_{total\_relay} = NRB_{backhaul} + NRB_{acceso\_relay} \quad (2.2)$$

Se impone que la cantidad de datos transmitidos en ambos enlaces sea la misma.

$$C_{backhaul} NRB_{backhaul} = C_{acceso\_relay} NRB_{acceso\_relay} = C_{acceso\_relay} (NRB_{total\_relay} - NRB_{backhaul}) \quad (2.3)$$

así que despejando de la expresión anterior el valor de  $NRB_{backhaul}$  se obtiene:

$$NRB_{backhaul} = \frac{C_{acceso\_relay} NRB_{total\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} \quad (2.4)$$

Por tanto, de la porción total de recursos que hay que reservar para las comunicaciones con UEs que están conectados al relay, la porción de recursos reservados al *backhaul* del total para una comunicación con un UE conectado a un relay es:

$$NRB_{\%backhaul} = \frac{C_{acceso\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} \quad (2.5)$$

y la porción correspondiente al acceso al relay es:

$$NRB_{\%accesorelay} = \frac{C_{backhaul}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} \quad (2.6)$$

por lo que se comprueba que el *throughput* extremo a extremo para una comunicación con el relay responde a la expresión vista con anterioridad en la ecuación (2.1).

$$C_{e2e} = \frac{C_{backhaul} C_{acceso\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} \quad (2.7)$$

Sin embargo, a la hora de calcular la cantidad de recursos totales que hacen falta para el soporte de los relays hay que tener en cuenta el despliegue y el algoritmo de Gestión de Recursos Radio que va a emplearse, pues como se ha visto anteriormente, dependiendo del método que se implemente, se obtendrá un patrón diferente de reutilización de los recursos que influirá, directamente, en el número de ellos que es necesario reservar para la comunicación en un sistema multisalto. Teniendo en cuenta que pueden existir diferentes relays dentro de la propia celda que van a utilizar la misma banda frecuencial para sus comunicaciones con los usuarios a los que se dará servicio mediante los mismos, el número de recursos necesarios para el enlace de acceso al relay se verá reducido en los casos en los que se emplee una reutilización de los mismos.

Suponiendo que se han de soportar 6 relays ( $N_{RS}$ ) tal y como se ha explicado antes, teniendo en cuenta que en el enlace *backhaul* no se va a producir reutilización de los recursos pero sí en enlace *access*, y definiendo el factor de reuso como  $6/FRF$  ( $FRF$  -*Fractional Reuse Factor*- es el número de bandas diferentes necesarias para el enlace de acceso al relay), se obtiene que la cantidad de recursos totales necesarios para la comunicación a través de los relays ( $NRB_{total\_N_{RS}}$ ) es:

$$\begin{aligned} NRB_{total\_N_{RS}} &= N_{RS} \cdot NRB_{backhaul} + N_{RS} \cdot \frac{FRF}{N_{RS}} \cdot NRB_{acceso\_relay} = \\ &= N_{RS} \cdot NRB_{backhaul} + FRF \cdot NRB_{acceso\_relay} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Así, la eficiencia espectral al servir a los usuarios de los  $N_{RS} = 6$  relays es:

$$\begin{aligned} C_{e\_6relays} &= \frac{N_{RS} \cdot C_{e2e} \cdot NRB_{total\_relay}}{NRB_{total\_N_{RS}}} = \frac{N_{RS} \cdot C_{backhaul} \cdot C_{acceso\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} \cdot \frac{NRB_{total\_relay}}{N_{RS} \cdot NRB_{backhaul} + FRF \cdot NRB_{acceso\_relay}} = \\ &= \frac{N_{RS} \cdot C_{backhaul} \cdot C_{acceso\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} \cdot \frac{NRB_{total\_relay}}{N_{RS} \cdot \frac{C_{acceso\_relay} \cdot NRB_{total\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}} + FRF \cdot \frac{C_{backhaul} \cdot NRB_{total\_relay}}{C_{backhaul} + C_{acceso\_relay}}} = \\ &= \frac{N_{RS} \cdot C_{backhaul} \cdot C_{acceso\_relay}}{N_{RS} \cdot C_{acceso\_relay} + FRF \cdot C_{backhaul}} = \left( \frac{1}{C_{backhaul}} + \frac{FRF}{N_{RS} \cdot C_{acceso\_relay}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Si se considera que la eficiencia en el enlace *backhaul* y acceso macro son idénticas  $C_{macro} = C_{backhaul}$  (esto no quiere decir que el usuario conectado al relay tenga esa eficiencia, pues en realidad su eficiencia es menor ya que necesita ocupar más recursos para tener una comunicación de las mismas características), y suponiendo que se pretende que los usuarios que se conecten al relay puedan transmitir la misma cantidad de datos, la relación entre  $NRB_{macro}$  y un usuario relay es:

$$C_{macro} \cdot NRB_{macro} = \left( \frac{1}{C_{backhaul}} + \frac{FRF}{N_{RS} \cdot C_{acceso\_relay}} \right)^{-1} \cdot \frac{NRB_{total\_N_{RS}}}{N_{RS}} \quad (2.10)$$

Como se ha explicado anteriormente, la comunicación entre R\_BS y un UE relay debe establecerse en, al menos, 2 TTIs (Figura 2.9). Así de cada dos subtramas, se puede establecer una subtrama completa (la subtrama blanca, vacía o *backhaul*) para las comunicaciones macro y el enlace *backhaul* y una porción  $\alpha$  de la subtrama normal o *unicast*, para las comunicaciones macro, con el siguiente reparto de recursos:

$$(1 + \alpha) \cdot NRB_{celda} = (1 - \beta) N_{UEs} nRB_{macro} + \beta N_{UEs} nRB_{backhaul} \quad (2.11)$$

donde  $\alpha$  es la parte de subtrama *unicast* o estándar dedicada a las comunicaciones macro y  $\beta$  es el porcentaje de UEs que se conectarán al relay respecto al número de UEs total, y  $nRB_{macro}$  y  $nRB_{backhaul}$  son las demandas individuales de recursos asociadas a cada uno de los UEs en los enlaces macro con la R\_BS y *backhaul*. En principio, se ha asumido por simplicidad que  $nRB_{macro} = nRB_{backhaul} = nRB_{acceso}$

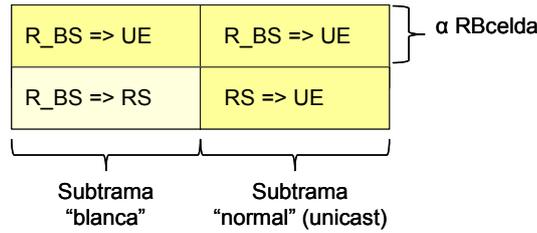


Figura 2.9 . Esquema de subtramas para modo relay, relays half-duplex

La parte restante de recursos de la subtrama *unicast* equivale a la zona en la que se mapean los recursos entre el relay y sus usuarios.

Reescribiendo la expresión anterior, se identifican los recursos dedicados al mapeo de las comunicaciones macro en la ecuación (2.12), asociados a la demanda de tráfico.

$$\alpha \cdot NRB_{celda} + (NRB_{celda} - \beta N_{UEs} nRB_{backhaul}) = (1 - \beta) N_{UEs} nRB_{macro} \quad (2.12)$$

Considerando el consumo de recursos asociados a los usuarios conectados al relay en el enlace de acceso al relay, y dado un factor de reuso FRF, se tiene la siguiente expresión:

$$(1 - \alpha) \cdot NRB_{celda} = \beta N_{UEs} \frac{FRF}{N_{RS}} nRB_{acceso\_relay} \quad (2.13)$$

Para obtener la relación entre alfa y beta, jugando con las expresiones anteriores y sumando (2.11) y (2.13) se obtiene que

$$\begin{aligned} 2 \cdot NRB_{celda} &= (1 - \beta) N_{UEs} nRB_{macro} + \beta \left(1 + \frac{FRF}{N_{RS}}\right) N_{UEs} nRB_{macro} = \\ &= \left[1 + \beta \left(\frac{FRF}{N_{RS}}\right)\right] N_{UEs} nRB_{macro} \end{aligned} \quad (2.14)$$

de donde se puede despejar el consumo de recursos asociado a los UEs macro:

$$N_{UEs} nRB_{macro} = \frac{2}{\left[1 + \beta \left(\frac{FRF}{N_{RS}}\right)\right]} NRB_{celda} \quad (2.15)$$

y sustituyendo en la expresión (2.11) se obtiene:

$$(1 + \alpha) \cdot NRB_{celda} = N_{UES} nRB_{macro} = \frac{2}{\left[ 1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right) \right]} NRB_{celda} \quad (2.16)$$

Así que la zona de la subtrama *unicast* de recursos que debe reservarse para el mapeo de las comunicaciones relativas al enlace macro en función del porcentaje de usuarios  $\beta$  que se conectarán al relay responde a la expresión (2.17).

$$\alpha = \frac{1 - \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right)}{1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right)} \quad (2.17)$$

Y la parte dedicada a las comunicaciones a través del relay (enlace *access*) viene dada por la expresión (2.18).

$$(1 - \alpha) \cdot = \frac{2 \cdot \beta \cdot \frac{FRF}{N_{RS}}}{\left[ 1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right) \right]} \quad (2.18)$$

Las expresiones anteriores, como se ha comentado, han sido calculadas en el caso en que la calidad en ambos enlaces de la transmisión multisalto sea de las mismas prestaciones. Si al comprobar experimentalmente que alguno de los enlaces permite utilizar una modulación más elevada que el otro, con el consecuente mayor volumen de tráfico que puede enviarse a través del mismo, se hará un rediseño del número de recursos necesarios para dicho enlace con mejores prestaciones para que en ambas fases la carga de datos sea equivalente y ninguno de los tramos suponga un cuello de botella.

Del tipo de subtramas establecidas para la comunicación en modo relay, debe existir cada cierto tiempo, las mencionadas subtramas blancas destinadas a la comunicación *backhaul*, pero no tienen por qué definirse una de cada dos, podrá diseñarse de manera variable en función de la necesidad de la estación base de comunicarse con los relays. Así, si se realiza el análisis anterior de una manera más general y suponiendo que se implementa una subtrama *unicast* tras  $N_{TTI}$  subtramas *backhaul* (Figura 2.10):

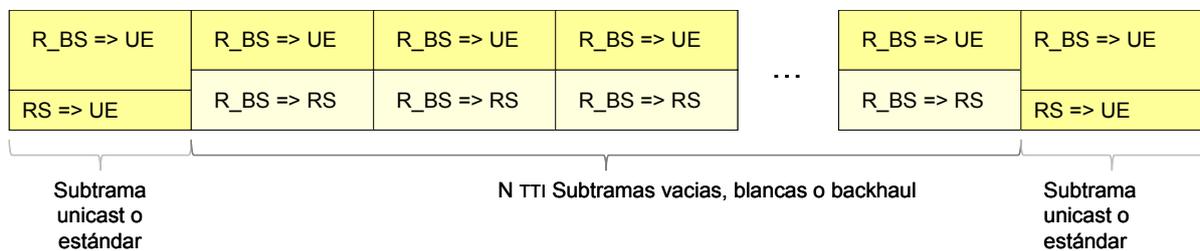


Figura 2.10 . Definición de subtramas unicast tras  $N_{TTI}$  subtramas blancas consecutivas

se obtendrán las expresiones (2.17) y (2.18) modificadas de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{1 - N_{TTI\_vacías} \cdot \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right)}{1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right)} \quad (2.19)$$

$$(1 - \alpha) \cdot = \frac{(N_{TTI\_vacías} + 1) \cdot \beta \cdot \frac{FRF}{N_{RS}}}{\left[ 1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right) \right]} \quad (2.20)$$

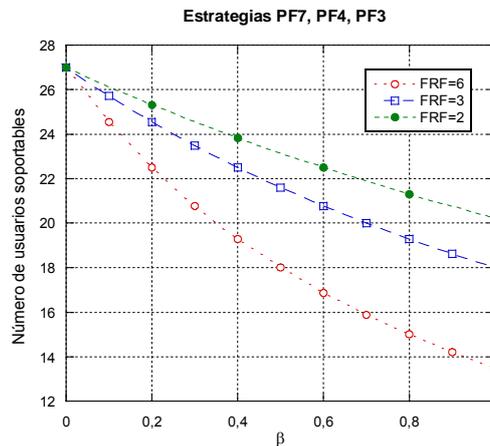
El número de subtramas vacías en relación a las subtramas estándar que se pueden considerar dependerá del retardo tolerable para la comunicación multisalto.

Por otra parte, depende también del factor de reuso y del porcentaje de usuarios que acceden al servicio. Está claro que  $\alpha$  debe ser mayor que 0, lo implica que:

$$1 - N_{TTI\_vacías} \cdot \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right) > 0 \quad (2.21)$$

Cuanto menor sea FRF (Figura 2.11 ) mayor porcentaje de UEs relay podrá soportarse con el mismo número de subtramas vacías presupuestadas. Además el número de usuarios soportables también depende del esquema de reuso.

$$N_{UEs} = \frac{(N_{TTI\_vacías} + 1)}{\left[ 1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right) \right]} \cdot \frac{NRB_{celda}}{NRB_{macro}} \cdot \frac{1}{(N_{TTI\_vacías} + 1)} = \frac{1}{\left[ 1 + \beta \left( \frac{FRF}{N_{RS}} \right) \right]} NRB_{celda} \quad (2.22)$$



**Figura 2.11 .** Número de UEs soportados en la red en función del método RRM implementado

Este análisis realizado es únicamente una aproximación para estudiar de forma teórica la capacidad de UEs soportados en la red en función del método RRM escogido y la sobrecarga de recursos que una transmisión multisalto implica, sin embargo, en realidad el estudio es más complejo, ya que en definitiva el número de subscriptores realmente soportables dependerá fundamentalmente de la capacidad de los enlaces. En estos algoritmos el distribuir más o menos el número de subtramas vacías a priori no afecta en cuanto al número de usuarios soportables.



# Resultados obtenidos

*En este capítulo se incluyen los resultados obtenidos de forma experimental, mediante simulación, de los algoritmos RRM en modo relay encontrados en la literatura, y sobre aquél que ofrece mejores prestaciones, se propone y analiza una variante con objeto de tener un mayor control de la interferencia y por tanto unas mejores prestaciones en la red.*

## 3.1. Análisis de resultados

Como comienzo para la comparativa de las prestaciones alcanzadas con cada uno de los métodos de gestión de recursos radio que va a analizarse, en primera instancia se realiza un estudio del enlace *access*, para observar en términos de capacidad, de paquetes erróneos recibidos por los usuarios (BLER: *Block Error Rate* / BER: *Bit Error Rate*), y de SINR conseguida, tanto en los usuarios que se enganchan a la estación base como en aquéllos a los que va a dar servicio una estación relay, las posibilidades que ofrece el algoritmo propuesto. A partir de estos resultados podrá analizarse de manera indirecta el comportamiento de un sistema real que trabaja con relays de tipo *half-duplex*, teniendo en cuenta el gasto de recursos necesario para el enlace *backhaul* y el hecho de que los relays no son capaces de transmitir en todos los instantes temporales.

Para la realización de las pruebas se ha utilizado una plataforma de simulación sobre la que ha sido necesaria la inclusión de las estaciones relay y la adaptación a las nuevas posibilidades de funcionamiento. Las condiciones sobre las que se han realizado las simulaciones se recogen en el Anexo C, y se basan en las utilizadas por los grupos de trabajo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) y 3GPP (*Third (3<sup>rd</sup>) Generation Partnership Project*) [20].

En primera instancia se ha considerado, con objeto de estudiar de manera global la reutilización de los recursos en cada uno de los patrones y la interferencia generada, que la totalidad de los relays de la celda están dando servicio a sus usuarios en todas las subtramas (subtramas *unicast* o estándar). Posteriormente se realizarán pruebas de un escenario más realista para analizar, en el caso de interés de relays de tipo *half-duplex*, el comportamiento de la red cuando los relays sólo son capaces de recibir información de R\_BS en una de las subtramas (*backhaul* o blancas) y dar servicio a sus UEs en otra subtrama diferente, aunque a partir de las simulaciones realizadas en primer lugar puede deducirse igualmente.

El número de usuarios se ha considerado elevado (90 UEs por celda) para estudiar, en condiciones de alta carga, el comportamiento de las estaciones relay y de las interferencias que los nuevos algoritmos de RRM pueden ocasionar. Los usuarios se implementan con tráfico *full-buffer* (todos los usuarios presentes en la red poseen permanentemente tráfico que transmitir), se desplazan aleatoriamente por la red a una velocidad de 3 Km/h, y el criterio de enganche a la entidad que les debe dar servicio, tras comprobar que engancharlos por distancia supone una infrutilización del sistema por ser elevado el número de usuarios que innecesariamente deben ser servidos por relays, será mediante RSSI (*Received Signal Strength Indication*), de modo que los móviles se conectarán a la estación base o al relay en función de la potencia que reciban de cada entidad, teniendo en cuenta para ello la potencia de transmisión, las pérdidas por propagación y desvanecimientos que existen en

cada uno de los enlaces, y las pérdidas de radiación de la antena de la R\_BS (en el relay no existen estas pérdidas porque se implementan con antenas transmisoras en el DL omnidireccionales).

El método de *scheduling* utilizado para ordenar a los usuarios por prioridades a la hora de recibir servicio es el PF (*Proportional Fair*) [21], explicado en el Anexo C. En este tipo de *scheduling* se pretende maximizar la tasa, por lo que los UEs en malas condiciones se verán limitados en las posibilidades de recibir servicio.

La estación base transmitirá con una potencia de 43dBm [20] a repartir entre toda la banda frecuencial, y las estaciones relay transmitirán con una potencia de 37dBm a repartir únicamente entre la banda frecuencial que utilizan en la comunicación con los usuarios a los que deben dar servicio. Esta potencia ha sido ajustada de tal modo que sea comparable a la de la estación base, y estableciendo un compromiso, de manera que el número de usuarios que se conecten a un relay para recibir servicio a través de él sea suficiente como para que los recursos que se le van a asignar puedan aprovechar la diversidad multiusuario, y entre el hecho de que no es recomendable cargar excesivamente las estaciones relay por el consumo de recursos extra que ello implica. Se hicieron pruebas previamente con una potencia de transmisión en el relay de 30dBm (incluidas en el Anexo D) y quedó patente que los recursos asignados a los relays estaban sobredimensionados para el número de usuarios que se enganchaban a los mismos, que resultaba escaso, ya que con la potencia transmitida por los relays fijada a 30dBm, el número de UEs conectados a los mismos para recibir servicio a través de ellos supone un porcentaje muy bajo del total de usuarios en la celda y se produce una infrautilización de una de las ventajas principales de la modulación OFDMA, como es el aprovechamiento de la diversidad multiusuario, y unas peores prestaciones en la red. Por ello, principalmente en el caso de celdas cargadas en las que se puede hacer uso de las buenas condiciones puntuales que sufren determinados usuarios, será conveniente redimensionar el sistema de modo que el número de usuarios enganchados a un relay sea suficiente, en comparación a los recursos de que dispone para sus comunicaciones, como para poder elegir una combinación adecuada de los recursos en los que va a recibir cada UE en función de las condiciones de los mismos en dichos recursos. Por ello y para poder dar servicio a un mayor número de subscriptores, la potencia de transmisión de los relays fue elevada hasta 37dBm.

Con el criterio de enganche establecido, el porcentaje de usuarios de la celda que va a conectarse con la R\_BS sigue siendo mucho mayor que el porcentaje de usuarios de la celda que se enganchará a un relay, por lo que habrá que considerar que gran parte del espectro frecuencial se dedique a las comunicaciones para los usuarios macro, dimensionando de forma correcta cada una de las subbandas a asignar a cada entidad en los diferentes algoritmos RRM.

Una vez que los usuarios son ordenados por prioridad según la función de *scheduling*, se les asignará el RB en el que mejores prestaciones puedan conseguir. Con el propósito de mantener un patrón de interferencia lo más estable posible, se establece una ordenación, de manera que los usuarios ubicados en un sector reciben, en primera instancia, recursos pertenecientes a la banda asignada a dicho sector, aunque si no existen recursos disponibles en el mismo o ninguno de los existentes ofrece una calidad de servicio lo suficientemente buena, se ofrece flexibilidad para que estos usuarios reciban, en orden de prioridad, recursos de los pertenecientes a otro de los sectores. Aquellos UEs que no cumplan el requisito de poder lograr en algún bloque de recursos las condiciones consideradas como umbrales en la simulación (conseguir al menos la SINR umbral establecida para la MCS con la que se va a servir al usuario, considerando como tal aquella con la que para dicha modulación se consigue una probabilidad de error (BLER) del 1%) quedará sin servicio en ese instante temporal.

Se han realizado las mismas pruebas con una modulación fija 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) y tasa de codificación 1/2, en la que se permitirá la transmisión de una tasa de 240 bits (12 portadoras x 10 símbolos OFDM x 4bits/ símbolo de la modulación 16-QAM x 1/2 de tasa de codificación) en cada RB y TTI (1ms), y posteriormente con una modulación adaptativa en función de la SINR que pueden obtener los usuarios en cada enlace.

A continuación se incluyen los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada uno de los métodos RRM objeto de estudio. Los parámetros que van a analizarse son la SINR que pueden

lograr en recepción los usuarios, la probabilidad de error de los paquetes recibidos, y la tasa total efectiva o correcta que puede transmitirse en la red, es decir, el número de usuarios a los que se les va a proporcionar un servicio adecuado.

Como se ha comentado anteriormente, para estudiar comparativamente los diferentes métodos RRM, se ha considerado a nivel de simulación únicamente la subtrama normal *unicast*, es decir, la totalidad de los relays de la celda operan en modo transmisión, por lo que los datos obtenidos corresponderán al enlace *access* y macro en las subtramas estándar. A partir de éstos, los resultados de la subtrama vacía se podrán extrapolar de forma aproximada considerando que en esta subtrama las transmisiones recibidas por los UEs macro tienen calidad equivalente a las recibidas por esos mismos UEs macro en la subtrama *unicast*, con lo que únicamente es necesario estimar el *overhead* asociado a las comunicaciones del *backhaul*. Para la estimación de dicho *overhead* habría que tener en cuenta, que en principio y con la misma modulación considerada en los diferentes enlaces existentes en la red, existiría una necesidad de reservar, por cada RB que el relay recibe para dar servicio a sus UEs en la subtrama estándar, otro RB para la comunicación en el enlace *backhaul* en la subtrama blanca. Sin embargo se ha observado en simulación que el enlace *backhaul* presenta buenas prestaciones, tanto como para poder utilizar MCS más elevadas (64-QAM 2/3) de las que están siendo consideradas para el servicio en el enlace *access*, por lo que el número de recursos necesarios para la comunicación entre R\_BS<->RS sería menor, y el *overhead* no supondría un porcentaje de la tasa de datos equivalente a la reserva del mismo número de recursos que los relays reciben. La tasa de ambos tipos de subtrama deberá ser promediada, considerando a priori que la mitad del total son de cada tipo (una de cada dos subtramas es blanca y la otra *unicast*).

Se incluyen pues a continuación, para cada método objeto de análisis, los resultados de tasa servida efectiva en la celda, así como de probabilidad de error en los datos recibidos en función de la zona a la que pertenecen los subscriptores y de la entidad que les sirve (Tabla 3.1. -Tabla 3.5. ). Si en alguna ocasión se observa que la tasa obtenida en la celda (por los UEs macro o UEs relay) de forma experimental es superior a la teórica se debe a que los usuarios, al poder saltar de una entidad a otra debido al cambio en las condiciones de canal que experimentan en el tiempo, pueden acumular tasa que en realidad fue servida por una entidad diferente a la que recoge finalmente las estadísticas. La tasa efectiva conseguida en la subtramas *unicast* es en sí la tasa efectiva resultante de las simulaciones (suma de la obtenida en los UEs macro y la obtenida en los UEs relay), y la tasa en las subtramas *backhaul* ha sido hallada a partir de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que para una modulación 64-QAM 2/3, del total de recursos disponibles en la celda, el número de RBs que han de reservarse para el enlace *backhaul* será el necesario para servir la tasa transmitida a los UEs relay en la subtrama *unicast* (cada RS va a transmitir con una modulación 16-QAM 1/2 y cada uno de ellos recibe 3 RBs para hacerlo) y teniendo en cuenta la tasa que se puede transmitir en cada RB con la modulación empleada en el *backhaul* (480 bits=12 portadoras x 10 símbolos OFDM x 6bits/ símbolo de la modulación 64-QAM x 2/3 de tasa de codificación, en cada RB y TTI).

PF7 (16-QAM 1/2)	RBs asignados	UEs macro		UEs relay	
		UEs enganchados	9		3 x 6RSs=18
		996		714	
		z0	544	z0	26
		z1	218	z1	352
		z2	234	z2	336
	UEs por entidad	52,42 a cada R_BS		37,58 (a los 6 RSs)	
	Tasa teórica celda	2,16 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,202		0,420	
		z0	0,038	z0	0,312
		z1	0,257	z1	0,253
		z2	0,702	z2	0,609
	Tasa efectiva celda (Mbps)	2,228		4,164	
		z0	1,354	z0	0,143
		z1	0,488	z1	2,090
		z2	0,384	z2	1,928
	Tasa total UEs (Mbps)	(6,392 subtrama normal + 4,456 subtrama backhaul) / 2 = 5,424			

Tabla 3.1. Resultados obtenidos para el método PF7, MCS fija 16-QAM 1/2

		UEs macro		UEs relay	
<b>PF7 "flexible" despliegue 2 (16-QAM ½)</b>	RBs asignados	9		3 x 6RSs= 18	
	UEs enganchados	994		716	
		z0	544	z0	26
		z1	215	z1	355
		z2	235	z2	335
	UEs por entidad	52,31 a cada R_BS		37,68 (a los 6 RSs)	
	Tasa teórica celda	2,16 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,178		0,198	
		z0	0,041	z0	0,129
		z1	0,233	z1	0,104
		z2	0,588	z2	0,310
	Tasa efectiva celda (Mbps)	2,227		4,244	
		z0	1,362	z0	0,153
z1		0,475	z1	2,177	
z2		0,386	z2	1,913	
Tasa total UEs(Mbps)	(6,471 subtrama normal + 4,454 subtrama backhaul) / 2 = 5,463				

**Tabla 3.2.** Resultados obtenidos para el método PF7 despliegue "flexible", MCS fija 16-QAM ½

		UEs macro		UEs relay	
<b>PF4 despliegue 1 (16-QAM ½)</b>	RBs asignados	18		3 x 6RSs = 18	
	UEs enganchados	992		718	
		z0	543	z0	27
		z1	216	z1	354
		z2	233	z2	337
	UEs por entidad	52,21		37,78	
	Tasa teórica celda	4,32 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,165		3,500	
		z0	0,029	z0	1,813
		z1	0,324	z1	2,413
		z2	0,555	z2	4,982
	Tasa efectiva celda (Mbps)	4,36		4,113	
		z0	2,841	z0	0,154
z1		0,899	z1	2,210	
z2		0,616	z2	1,748	
Tasa total UEs (Mbps)	(8,473 subtrama normal + 4,36 subtrama backhaul) / 2 = 6,417				

**Tabla 3.3.** Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM ½

		UEs macro		UEs relay	
<b>PF4 despliegue 2 (16-QAM ½)</b>	RBs asignados	18		3 x 6RSs = 18	
	UEs enganchados	990		720	
		z0	543	z0	27
		z1	216	z1	354
		z2	231	z2	339
	UEs por entidad	52,1		37,89	
	Tasa teórica celda	4,32 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,137		0,791	
		z0	0,027	z0	0,701
		z1	0,194	z1	0,544
		z2	0,563	z2	1,124
	Tasa efectiva celda	4,339		4,032	
		z0	2,839	z0	0,159
z1		0,894	z1	2,203	
z2		0,606	z2	1,669	
Tasa total UEs (Mbps)	(8,371 subtrama normal + 4,339 subtrama backhaul) / 2 = 6,355				

**Tabla 3.4.** Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM ½

PF3 (16-QAM ½)	UEs macro		UEs relay	
	RBs asignados	21		3 x 6RSs = 18
UEs enganchados	990		720	
	z0	544	z0	26
	z1	214	z1	356
	z2	232	z2	338
UEs por entidad	52,10		37,89	
Tasa teórica celda	5,04 Mbps		4,32 Mbps	
BLER (%)	0,291		11,478	
	z0	0,025	z0	4,755
	z1	0,484	z1	5,658
	z2	1,317	z2	23,965
Tasa efectiva celda (Mbps)	5,061		3,792	
	z0	3,364	z0	0,168
	z1	1,008	z1	2,582
	z2	0,673	z2	1,042
Tasa total UEs (Mbps)	(8,853 subtrama normal + 4,338 subtrama backhaul) / 2 = 6,596			

Tabla 3.5. Resultados obtenidos para el método PF3, MCS fija 16-QAM ½

Así, sobre los resultados obtenidos en simulación, se ha considerado que existe una necesidad de reservar 9RBs para las comunicaciones *backhaul* para dar servicio posteriormente a los UEs relay en las subtramas *unicast*, y habiendo tenido en cuenta, como se ha comentado, que en la subtrama estándar transmiten los 6 relays y cada uno de ellos con una MCS 16-QAM 1/2 mientras que en la subtrama blanca, para la comunicación R\_BS->RS, se emplea MCS 64-QAM 2/3.

En la Figura 3.1 -Figura 3.5 se representan los valores de SINR obtenidos en los UEs, tanto en los servidos por la R\_BS como por RSs, para cada uno de los métodos propuestos. Como puede observarse, PF7 en cualquiera de sus dos despliegues analizados, es el método que ofrece mejores valores de SINR debido a que la menor reutilización de recursos dentro de la propia celda mantiene la interferencia a un nivel menor, y aquél que presenta una peor calidad en los enlaces es PF3, por ser el que mayor reutilización de recursos presenta en de la propia celda.

De entre los dos despliegues del método PF4 analizados, para un mismo patrón de reutilización de recursos, el que aprovecha el mismo espectro en los relays opuestos (despliegue 2), ofrece un servicio de mejor calidad. Los usuarios que reciben servicio directamente de R\_BS presentan el mismo comportamiento en todos los métodos, ya que en todos ellos poseen una banda dedicada a sus comunicaciones sólo reutilizada en el resto de las celdas para las mismas comunicaciones, por lo que para los mismos no existe interferencia intra-celular.

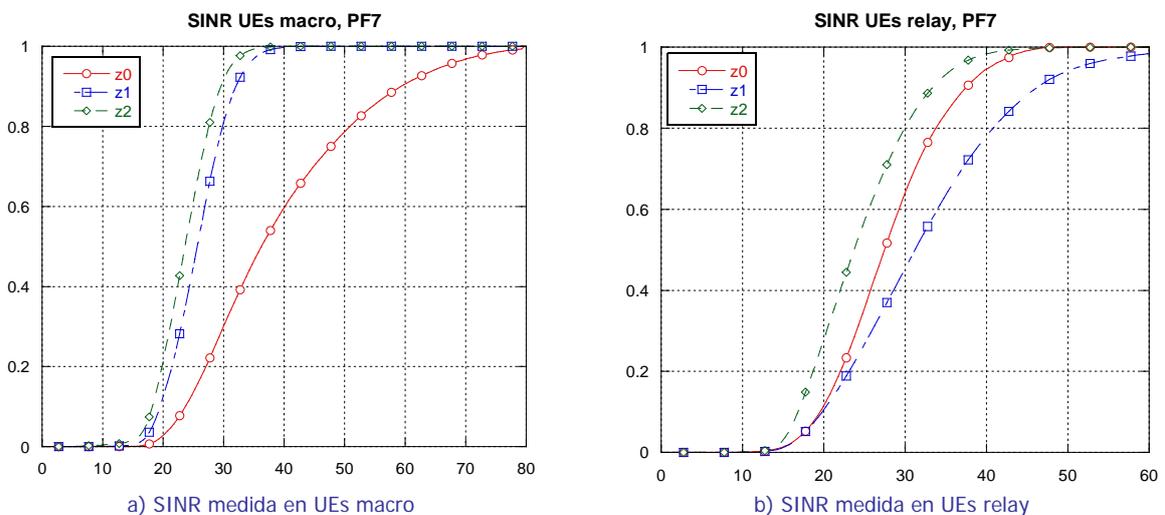


Figura 3.1 . SINR obtenida en PF7 despliegue 1, MCS fija 16-QAM ½

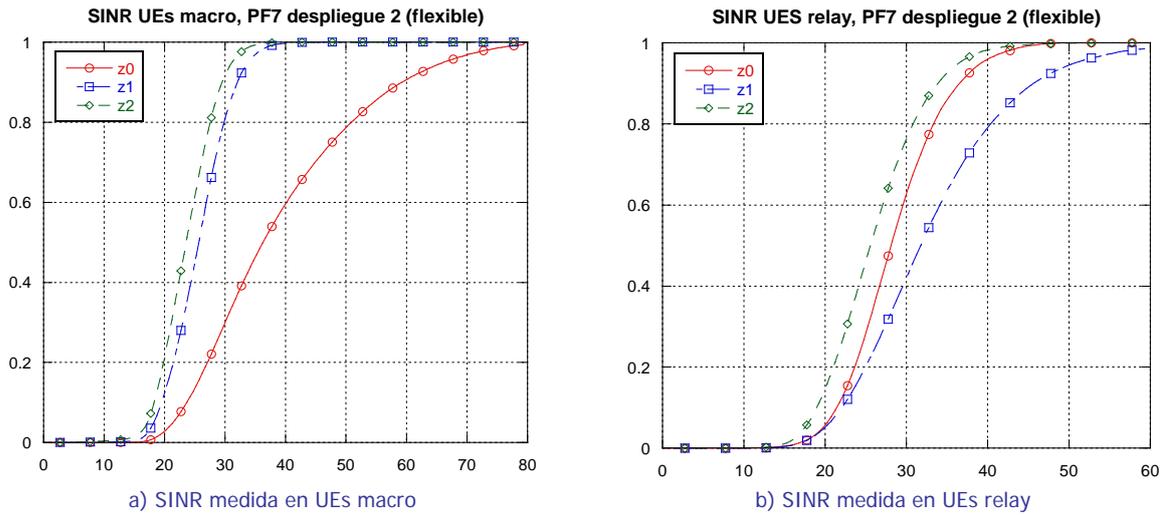


Figura 3.2 . SINR obtenida en PF7 despliegue 2, MCS fija 16-QAM 1/2

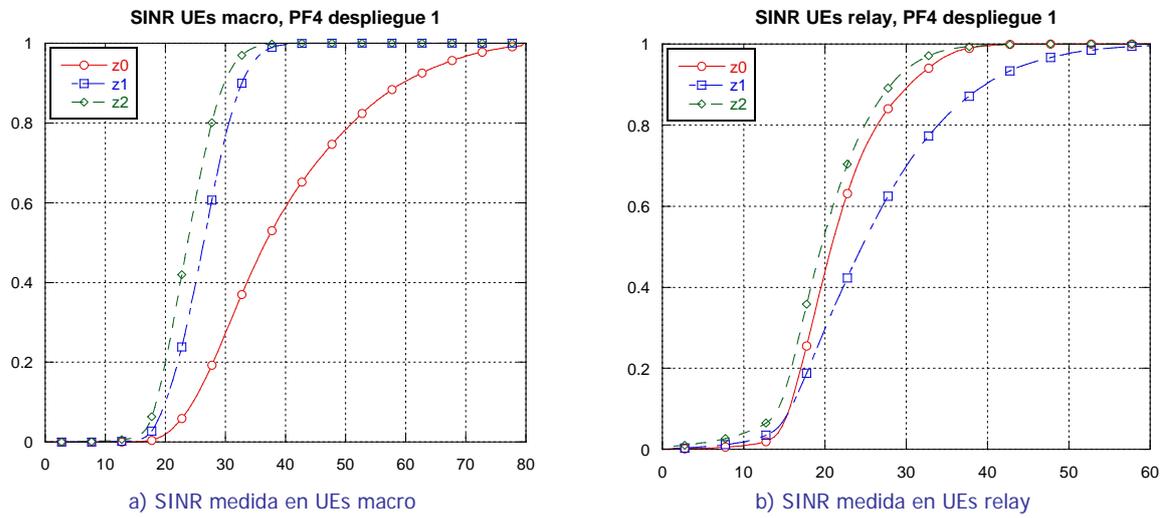


Figura 3.3 . SINR obtenida en PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM 1/2

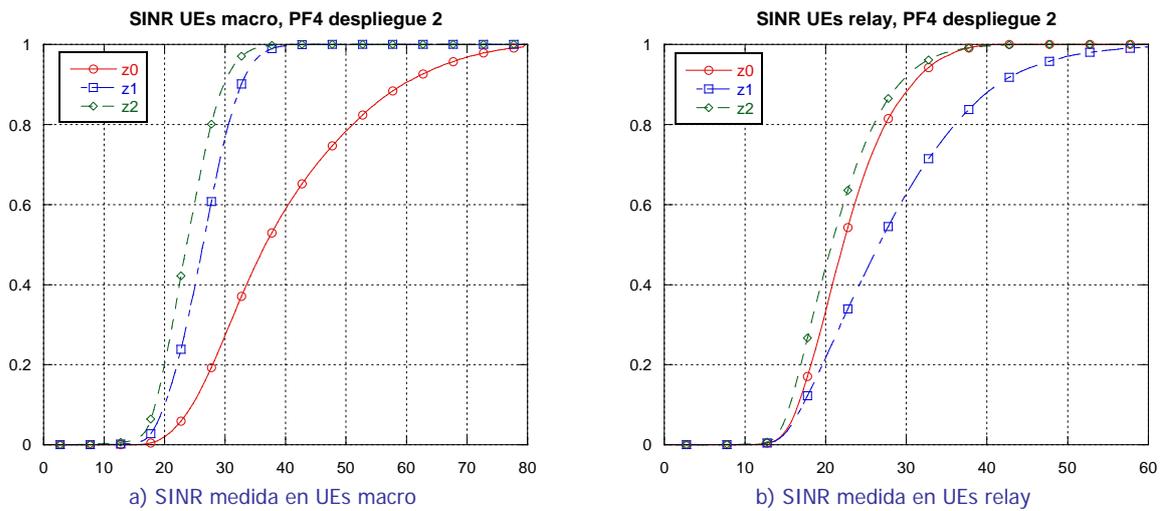


Figura 3.4 . SINR obtenida en PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM 1/2

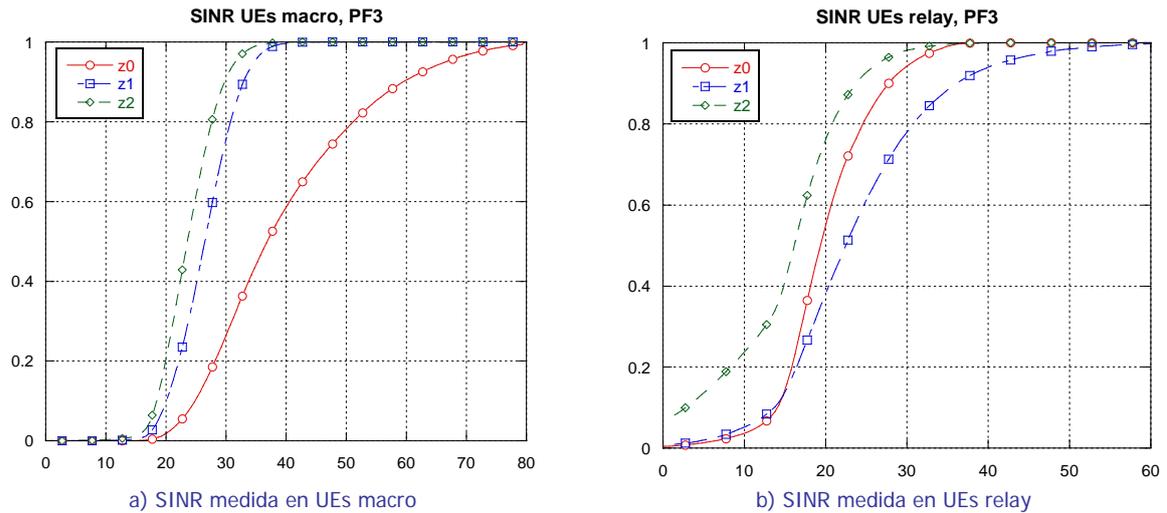


Figura 3.5 . SINR obtenida en PF3, MCS fija 16-QAM 1/2

De los esquemas anteriores, el segundo de los despliegues propuestos para PF4 es el que ofrece a priori, un mejor compromiso entre la tasa servida, la probabilidad de que los datos sean correctos (BLER por debajo del 1% presupuestado, por lo que la necesidad de retransmisiones será mínima), el servicio homogéneo que se ofrecerá a los usuarios (no existe bloqueo en los usuarios a priori problemáticos en un enlace directo con R\_BS) y la SINR obtenida en recepción, junto con el primero de los despliegues de PF4 y el de PF3, que mantienen a un buen nivel la tasa efectiva servida en la red, aunque derivan en una probabilidad de error en la transmisión más elevada que provocaría la necesidad de un mayor número de retransmisiones con los perjuicios que esto supone y una peor calidad del enlace. Comparando todos ellos entre sí, y como era de esperar según el análisis teórico realizado en el capítulo anterior, a menor reutilización de recursos, es decir, a menor ancho de banda disponible en la celda para dar servicio a los usuarios, menor será la tasa servida y con ello la capacidad soportada en la red, aunque por otro lado menor interferencia se genera y por ello la probabilidad de que las transmisiones se realicen con éxito es mayor. Ponderando los factores de probabilidad de error, capacidad soportada en la red, y SINR en busca del compromiso más eficiente, se concluye que el método más adecuado es pues el segundo de los despliegues de PF4 implementado.

Si en vez de utilizar una modulación fija como la empleada en las simulaciones anteriores se posibilita el hecho de que cada UE pueda recibir con una MCS diferente adaptativa a las condiciones en que dicho subscriptor se encuentra (si un UE prioritario se encuentra en malas condiciones podrá recibir con una MCS más baja y si por el contrario el UE posee una buena calidad de canal recibirá con MCS altas), se obtendrán los siguientes resultados de BLER y tasa servida para cada una de las simulaciones anteriores (Tabla 3.6. -Tabla 3.10. ) y de SINR lograda en los UEs (Figura 3.6 ).

PF7 adaptativo	BER (%)	UEs macro		UEs relay	
		z0	0,098	z0	0,633
Utilización MCS (%)	z1	0,663	z1	0,516	
	z2	1,548	z2	1,333	
	QPSK 1/2	2,79	QPSK 1/2	1,55	
	16-QAM 1/2	4,64	16-QAM 1/2	3,10	
Tasa efectiva celda (Mbps)	16-QAM 3/4	15,88	16-QAM 3/4	15,19	
	64-QAM 2/3	76,69	64-QAM 2/3	80,16	
	4,044		7,877		
	z0	2,713	z0	0,292	
Tasa total UEs(Mbps)	z1	0,747	z1	4,229	
	z2	0,584	z2	3,355	
		(11,921 subtrama normal + 4,493 subtrama backhaul) / 2=8,207			

Tabla 3.6. Resultados obtenidos para el método PF7, MCS adaptativa

PF7 flexible adaptativo	BER (%)	UEs macro		UEs relay	
		0,413			0,644
Utilización MCS (%)	z0	0,100		z0	0,572
	z1	0,666		z1	0,385
	z2	1,544		z2	0,983
	QPSK 1/2	2,81		QPSK 1/2	0,85
Tasa efectiva celda (Mbps)	16-QAM 1/2	4,63		16-QAM 1/2	2,64
	16-QAM 3/4	15,89		16-QAM 3/4	14,23
	64-QAM 2/3	76,67		64-QAM 2/3	83,13
	4,037			8,011	
Tasa total UEs(Mbps)	z0	2,712		z0	0,297
	z1	0,753		z1	4,349
	z2	0,572		z2	3,365
	(12,048 subtrama normal + 4,485 subtrama backhaul) / 2 = 8,267				

**Tabla 3.7.** Resultados obtenidos para el método PF7 despliegue "flexible", MCS adaptativa

PF4 despliegue 1 adaptativo	BER (%)	UEs macro		UEs relay	
		0,442			1,8088
Utilización MCS (%)	z0	0,114		z0	1,591
	z1	0,724		z1	1,230
	z2	1,898		z2	2,656
	QPSK 1/2	3,42		QPSK 1/2	10,87
Tasa efectiva celda (Mbps)	16-QAM 1/2	5,25		16-QAM 1/2	12,16
	16-QAM 3/4	16,69		16-QAM 3/4	26,39
	64-QAM 2/3	74,64		64-QAM 2/3	50,57
	7,881			6,605	
Tasa total UEs(Mbps)	z0	5,547		z0	0,228
	z1	1,372		z1	3,779
	z2	0,962		z2	2,598
	(14,486 subtrama normal + 5,692 subtrama backhaul) / 2 = 10,089				

**Tabla 3.8.** Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 1, MCS adaptativa

PF4 despliegue 2 adaptativo	BER (%)	UEs macro		UEs relay	
		0,431			1,926
Utilización MCS (%)	z0	0,117		z0	1,365
	z1	0,716		z1	1,378
	z2	1,812		z2	2,807
	QPSK 1/2	3,27		QPSK 1/2	10,54
Tasa efectiva celda (Mbps)	16-QAM 1/2	5,28		16-QAM 1/2	10,77
	16-QAM 3/4	16,73		16-QAM 3/4	24,01
	64-QAM 2/3	74,71		64-QAM 2/3	54,68
	7,923			6,742	
Tasa total UEs (Mbps)	z0	5,552		z0	0,244
	z1	1,373		z1	3,932
	z2	0,964		z2	2,566
	(14,665 subtrama normal + 5,722 subtrama backhaul) / 2 = 10,193				

**Tabla 3.9.** Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS adaptativa

PF3 adaptativo	BER (%)	UEs macro		UEs relay	
		0,449			4,484
Utilización MCS (%)	z0	0,114		z0	2,466
	z1	0,782		z1	2,242
	z2	1,945		z2	10,035
	QPSK 1/2	3,88		QPSK 1/2	27,31
Tasa efectiva celda (Mbps)	16-QAM 1/2	5,63		16-QAM 1/2	15,61
	16-QAM 3/4	16,74		16-QAM 3/4	23,22
	64-QAM 2/3	73,74		64-QAM 2/3	33,86
	9,110			5,371	
Tasa total UEs(Mbps)	z0	6,482		z0	0,229
	z1	1,547		z1	3,693
	z2	1,082		z2	1,449
	(14,481 subtrama normal + 6,507 subtrama backhaul) / 2 = 10,494				

**Tabla 3.10.** Resultados obtenidos para el método PF3, MCS adaptativa

En este caso el *overhead* se calcula del mismo modo y a partir de la tasa que se transmite en las subtramas estándar en el enlace *access*, teniendo en cuenta que el número de recursos necesarios para las subtramas blancas en el *backhaul*, enlace en el que se va a emplear la modulación 64-QAM 2/3, será el resultado del cociente entre la tasa efectiva en el *access* y la tasa que se permite transmitir en cada RB con dicha modulación empleada (480 bits). Calculados los recursos necesarios para la comunicación R\_BS->RS, el resto de RBs serán empleados para la comunicación con los UEs macro y la transmisión de tasa efectiva a UEs propiamente dichos en las subtramas blancas.

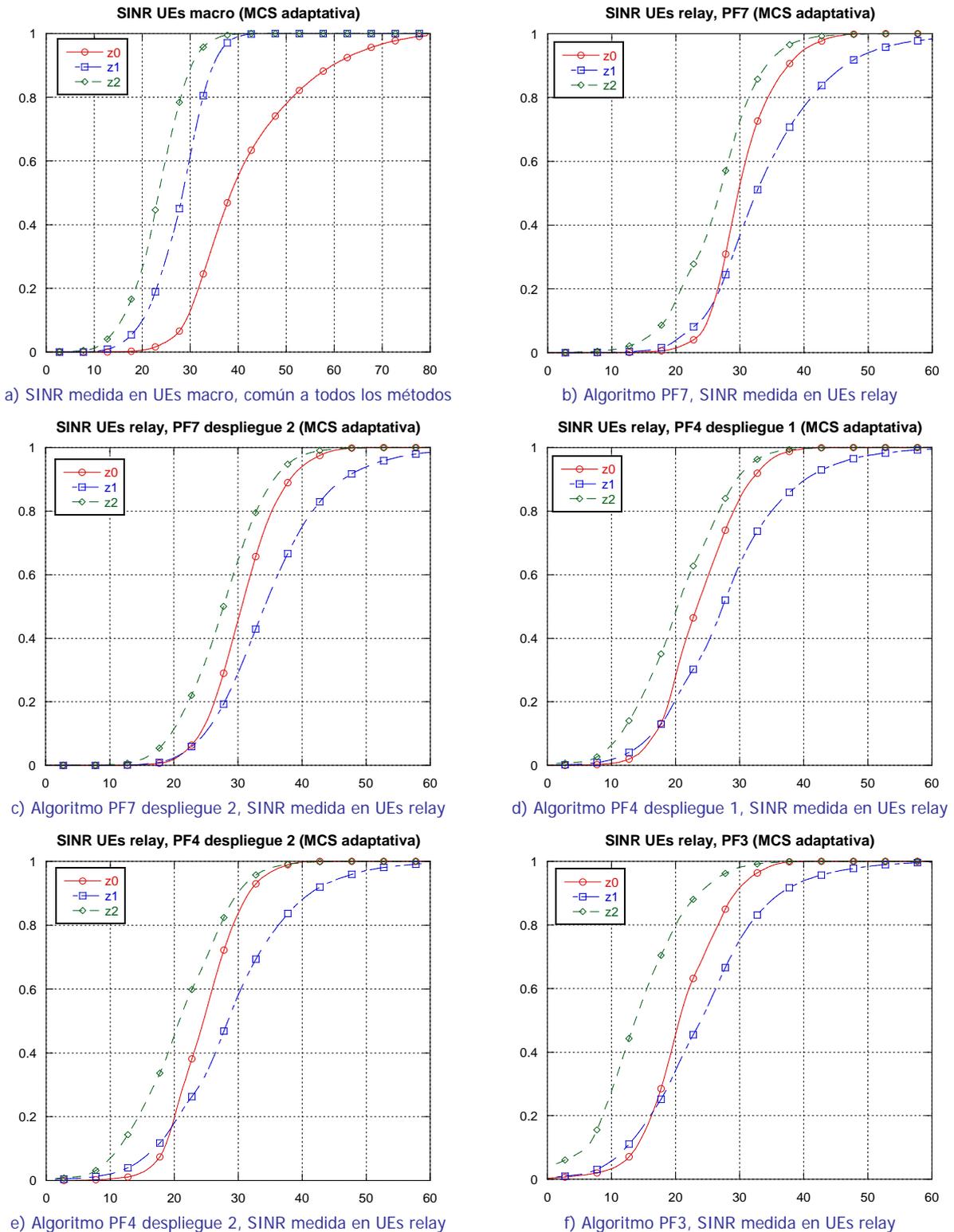


Figura 3.6 . SINR obtenida en cada algoritmo RRM simulado, MCS adaptativa

Como puede observarse en los resultados anteriores, el hecho de utilizar una MCS adaptativa posibilita el servicio de un mayor volumen de tráfico en la red, aunque también hay que tener en cuenta que por otro lado aumenta ligeramente el BLER debido al hecho de que las variaciones en la estimación de las condiciones de los usuarios provocan, para volúmenes de tráfico elevados, probabilidades de error mayores. Sin embargo el hecho de utilizar modulaciones adaptativas permite, para un gran número de usuarios que se encuentran en buenas condiciones con R\_BS o RS según corresponda, la recepción de un mayor número de paquetes en el mismo intervalo temporal. De este modo la tasa servida efectiva en la celda para cada uno de los algoritmos es mayor que es el caso de utilizar una modulación fija.

La Tabla 3.11. incluye el volumen de tráfico correcto para cada uno de los métodos anteriores para el caso de empleo de una modulación constante 16-QAM 1/2 y para el caso de modulación adaptativa.

Método	Modulación	Tasa efectiva celda (Mbps)
PF7 despliegue 1	16-QAM 1/2	5,424
	MCS adaptativa	8,207
PF7 despliegue 2	16-QAM 1/2	5,463
	MCS adaptativa	8,267
PF4 despliegue 1	16-QAM 1/2	6,417
	MCS adaptativa	10,089
PF4 despliegue 2	16-QAM 1/2	6,355
	MCS adaptativa	10,193
PF3	16-QAM 1/2	6,596
	MCS adaptativa	10,494

Tabla 3.11. Resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los métodos analizados

Una vez estudiado el enlace *access*, y a partir de él habiendo conocido de manera indirecta los resultados de un escenario real en el que se requiere un gasto extra de recursos para el soporte de los nuevos enlaces, el siguiente paso para el análisis experimental de cada uno de los métodos propuestos, es la simulación, de forma más realista, de un escenario con relays *half-duplex*, en los cuales se operará en las estaciones relay en modo transmisión en una de las subtramas y en modo recepción en el TTI siguiente (Figura 3.7 ). Con objeto de coordinar los recursos de la manera que a priori parece la más lógica, tres del total de los relays de cada celda (relays no adyacentes) servirán a sus usuarios en un determinado instante temporal, mientras el resto de relays se encuentra en modo Rx para su comunicación con la estación base, y en el siguiente de los instantes temporales funcionarán a la inversa.

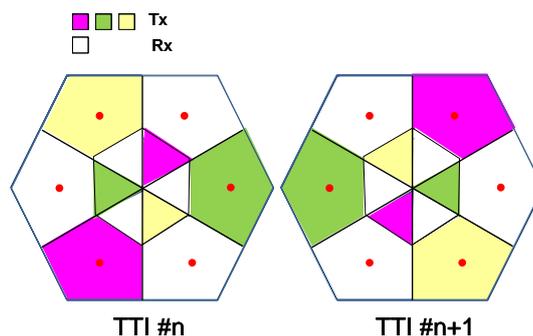


Figura 3.7 . Esquema de coordinación para relays half-duplex

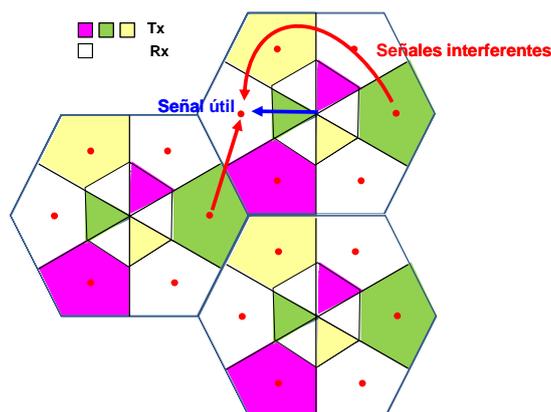
Con esta situación real de relays *half-duplex* se estudia a continuación el algoritmo PF4 despliegue 2, que es el que podrá ofrecer mejores prestaciones. Sobre los datos obtenidos en simulación ya han sido reservados de manera teórica los recursos necesarios para el enlace *backhaul*, por lo que la tasa efectiva que se sirve en la celda ya es en sí tasa que reciben propiamente los móviles. Para ello y como posteriormente se justificará, se ha tenido en cuenta, que se requiere la misma modulación que en el resto de los enlaces de la celda, por lo que el número de RBs necesarios en los dos enlaces de la transmisión multisalto es idéntico (9 RBs reservados para el enlace *backhaul*).

PF4 despliegue 2 (16-QAM 1/2)	RBs asignados	UEs macro		UEs relay	
		UEs enganchados	18 (+9 para el backhaul)		3 x 6RSs = 18
	990			720	
		z0	543	z0	27
		z1	214	z1	356
		z2	233	z2	337
	UEs por entidad	52,1		37,89	
	Tasa teórica celda	4,32 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,140		0,433	
		z0	0,028	z0	0,281
		z1	0,187	z1	0,240
		z2	0,580	z2	0,637
	Tasa efectiva celda (Mbps)	4,336		2,081	
		z0	2,833	z0	0,060
		z1	0,881	z1	1,018
		z2	0,622	z2	1,002
	Tasa total UEs (Mbps)	6,417			

**Tabla 3.12.** Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM 1/2, simulación relays half-duplex

Evidentemente, en este caso, la tasa que reciben los usuarios que se enganchan a los relays ha disminuido respecto a los resultados de la simulación del enlace *access*, reduciéndose en un valor que es aproximadamente la mitad que en dicho caso debido a que los relays sólo son capaces de servir a sus usuarios en una de cada dos subtramas. El escenario de simulación analizado anteriormente varía respecto al caso de analizar el enlace *access*, y es que la interferencia que en la situación anterior se generaba en los UEs relay por parte del otro relay que dentro de la propia celda utilizaba el mismo espectro frecuencial, no ha sido tenida en cuenta, pues esos RBs se han reservado de forma teórica para las futuras comunicaciones entre R\_BS y el RS antes problemático, que ahora se encontraría en modo Rx.

Cuando se procede a la simulación del sistema en su totalidad, teniendo en cuenta las interferencias que se provocarán entre los relays que transmiten y los que reciben (Figura 3.8), las prestaciones de la red se estropean considerablemente y la SINR que reciben los relays en el *backhaul* es mucho menor (en torno a 18 dB) de la necesaria para emplear en este enlace modulaciones elevadas, por lo que podrá utilizarse, a lo sumo, 16-QAM 1/2. De ahí que se reservaran para el *backhaul* 9RBs (Tabla 3.12.). La Figura 3.9 ilustra la SINR lograda por los UEs macro y relay en este caso simulado.



**Figura 3.8 .** Interferencias potenciales en el enlace backhaul, PF4 despliegue 2, relays half-duplex

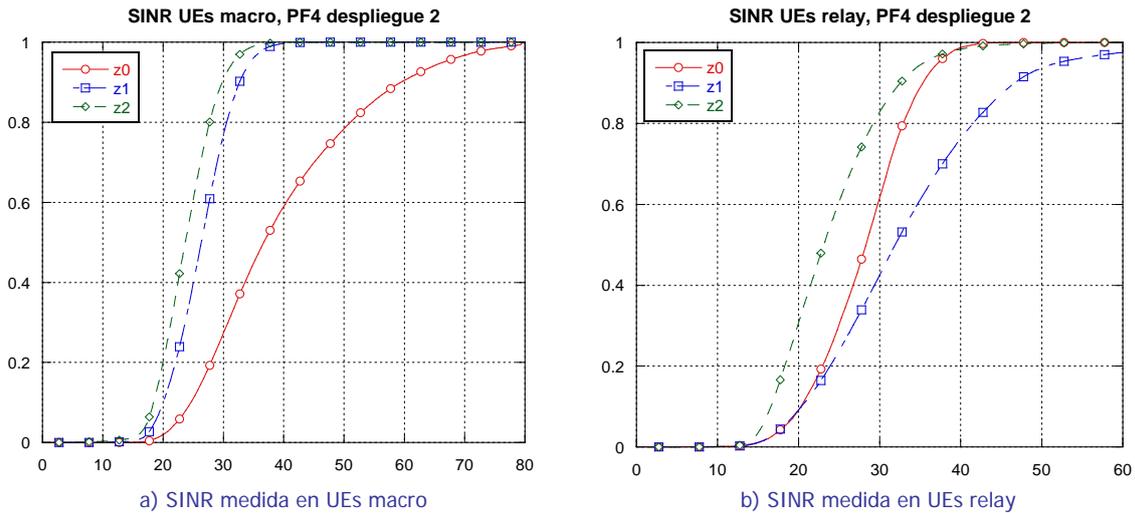


Figura 3.9. SINR obtenida para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM  $\frac{1}{2}$ , simulación relays half-duplex

Aunque parecía que potencialmente este algoritmo era lo suficientemente bueno como para lograr en todos los enlaces una buena calidad en la transmisión, mantener una baja probabilidad de error y servir un volumen de tráfico elevado, se ha comprobado, como se menciona anteriormente, que las prestaciones del enlace *backhaul* al simular la totalidad de la red se han degradado considerablemente, por lo que no se aprovecha al máximo el total de recursos disponible para servir tráfico a los UEs y se ha de buscar una variante de coordinación de los recursos que permita un mayor control de la interferencia y garantice que todos los parámetros necesarios para el buen funcionamiento del sistema se mantienen dentro de los objetivos propuestos.

### 3.2. Algoritmo propuesto

Sobre el algoritmo que mejores prestaciones ofrece de todos los analizados en cuanto a probabilidad de error en la transmisión, capacidad de subscriptores soportados y calidad del enlace, es decir, sobre la segunda de las variantes del método PF4, se va a proponer una variante de las bandas utilizables en cada zona con objeto de coordinar las diferentes celdas de la red y separar en la medida de lo posible las entidades que trabajarán sobre el mismo espectro. De este modo se reducirá la interferencia y mejorarán los problemas vistos anteriormente. Para su estudio se ha considerado ya el hecho de que los relays son *half-duplex*, por lo que en un TTI tres de los seis relays de la celda operarán en modo Tx mientras el resto lo hace en modo Rx, y en la siguiente subtrama los papeles se intercambian, recibiendo aquéllos que anteriormente operaban como transmisores y viceversa.

En la Figura 3.10 puede observarse la distribución del espectro frecuencial en función de la celda y de la entidad que dará servicio. Se han reservado igualmente, de la zona de recursos destinada a la R\_BS, parte de ellos para el enlace *backhaul* y para el estudio de las prestaciones que se obtienen en el mismo. Cada uno de los colores representa una zona espectral a utilizar en el enlace R\_BS->UE macro y RS->UE relay. El color de las flechas del enlace *backhaul* define la zona frecuencial reservada para esta transmisión. Hay que tener en cuenta, que aunque parezca que dentro de la propia celda para diferentes transmisiones provenientes de la R\_BS es factible utilizar los mismos recursos, en el momento en que sean empleados para un sector quedarán automáticamente descartados para ser empleados dentro de la propia celda por otro sector en el mismo instante temporal, pues no se permite una reutilización mayor a nivel de celda con objeto de controlar la interferencia. De este modo, para las comunicaciones entre R\_BS y UEs macro existirá un total de recursos utilizables igual a los existentes en el espectro frecuencial de todo el ancho de banda disponible excepto los empleados para el enlace *backhaul*, y para cada enlace *access* se mantiene el número de RBs presupuestados para los métodos anteriores.

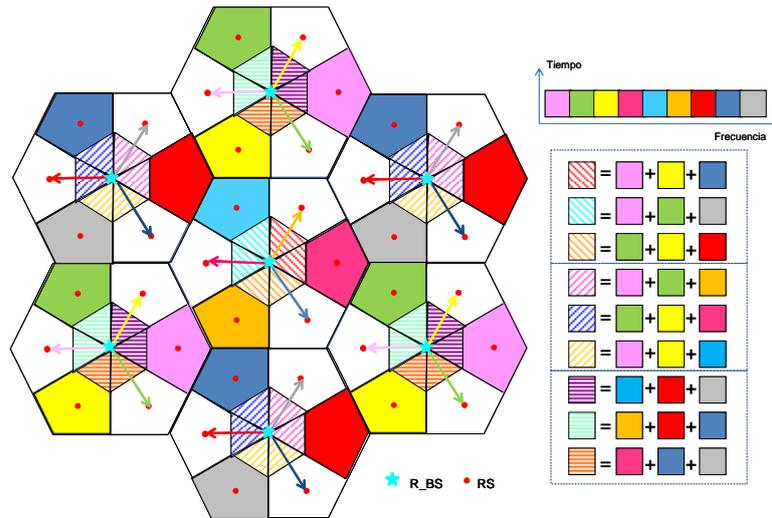


Figura 3.10 . Algoritmo RRM en modo relay propuesto

La Tabla 3.13. resume los resultados obtenidos con el método propuesto en el caso de que los usuarios reciban con una modulación fija 16-QAM 1/2 y la Figura 3.11 los valores de SINR obtenidos.

Algoritmo propuesto (16-QAM 1/2)	RBs asignados	UEs macro		UEs relay	
		UEs enganchados	27	3 x 6RSs =18	719
		z0	544	z0	26
		z1	214	z1	356
		z2	233	z2	337
	UEs por entidad	52,15		37,84	
	Tasa teórica celda	6,48 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,135		0,942	
		z0	0,025	z0	0,734
		z1	0,236	z1	0,684
		z2	0,618	z2	1,283
	Tasa efectiva celda (Mbps)	6,449		1,942	
		z0	4,492	z0	0,066
		z1	1,190	z1	1,048
		z2	0,766	z2	0,828
	Tasa efectiva recibida UEs (Mbps) teniendo en cuenta overhead teórico (33%) de 9RBs	4,301		1,942	
		z0	2,996	z0	0,066
		z1	0,794	z1	1,048
		z2	0,511	z2	0,828
	Tasa total (Mbps)	6,243			

Tabla 3.13. Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS fija 16-QAM 1/2, simulación relays half-duplex

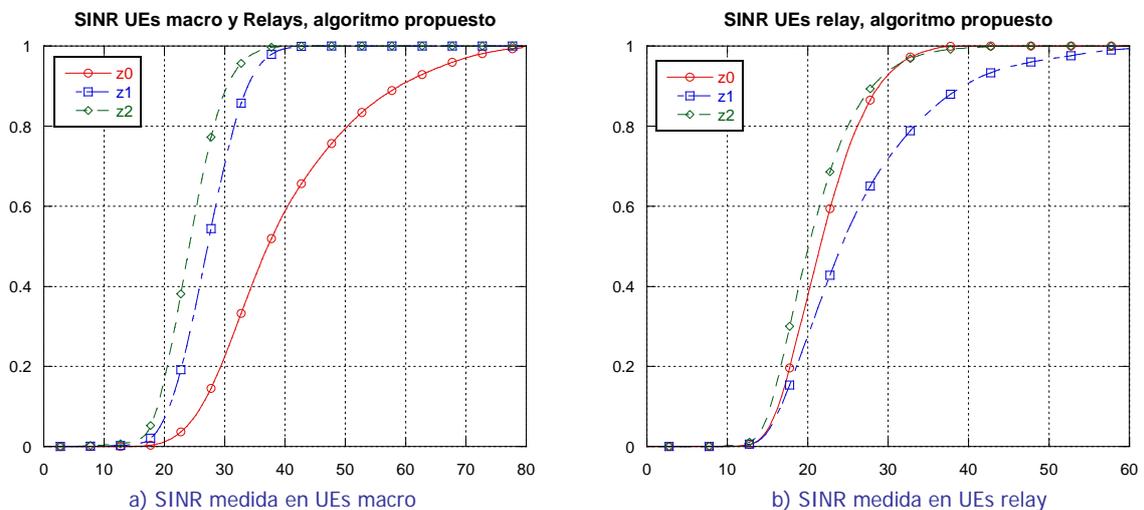


Figura 3.11 . SINR obtenida para el método propuesto, MCS fija 16-QAM 1/2, simulación relays half-duplex

En la tabla anterior (Tabla 3.13. ) se recogen los resultados habiendo considerado como tasa teórica servida por la R\_BS la destinada a los relays y a los UEs macro, y posteriormente se ha eliminado la tasa que teóricamente sería la recibida por las estaciones relay, de ahí que en principio se disponga del total de los 27 RBs para las comunicaciones de las que se debe encargar la estación base. Si se considera directamente sobre la plataforma de simulación que con MCS 16-QAM 1/2 se requeriría en principio un total de 9 RBs para las comunicaciones en el enlace *backhaul* entre R\_BS y los tres relays que se encuentran en cada TTI en modo Rx, los resultados de la simulación de la red con relays *half-duplex*, en la que se han reservado de antemano los recursos necesarios para el *backhaul*, se incluyen en Tabla 3.14. donde puede observarse, constatando los datos anteriores, la similitud con los mismos cuando han sido hallados teóricamente (Tabla 3.13. ).

Algoritmo propuesto (16-QAM 1/2)	UEs macro		UEs relay	
	RBs asignados	18		3 x 6RSs =18
Tasa teórica celda	4,32 Mbps		4,32 Mbps	
BLER (%)	0,082		0,959	
	z0	0,015	z0	0,749
	z1	0,124	z1	0,669
	z2	0,346	z2	1,337
Tasa efectiva celda (Mbps)	4,323		1,919	
	z0	2,875	z0	0,069
	z1	0,865	z1	1,026
	z2	0,584	z2	0,823
Tasa total (Mbps)	6,242			

Tabla 3.14. Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS fija 16-QAM 1/2, simulación relays half-duplex con reserva de recursos para el enlace backhaul

La Figura 3.12 refleja los datos de SINR obtenida en los UEs enganchados a R\_BS y en los que son servidos por los relays en el método RRM propuesto.

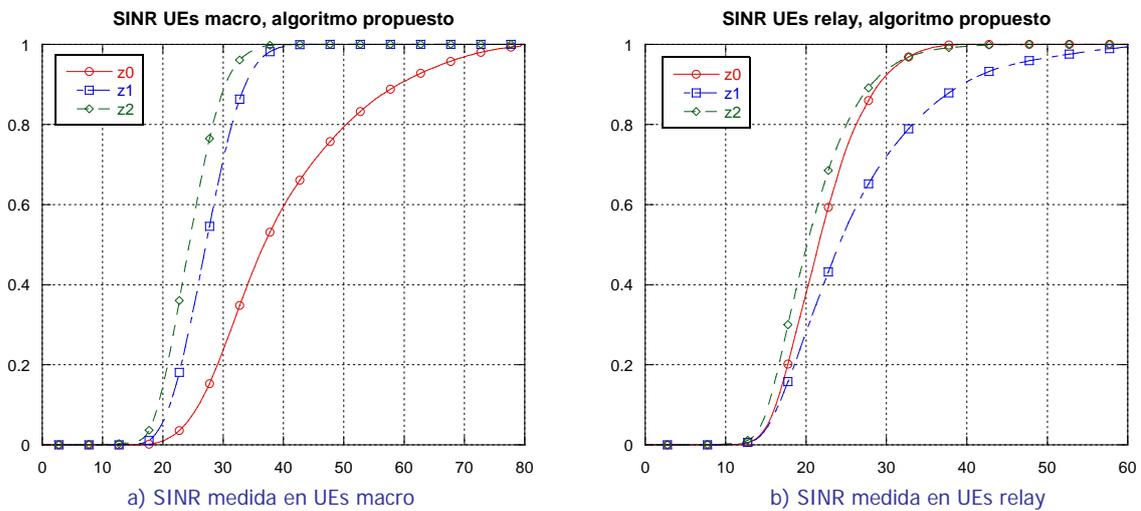


Figura 3.12 . SINR obtenida para el método propuesto, MCS fija 16-QAM 1/2, simulación relays half-duplex con reserva de recursos para el enlace backhaul

Sin embargo en este caso sí se ha comprobado en simulación que el enlace *backhaul* presenta buenas prestaciones (SINR en torno a los 30 dB), tanto como para poder utilizar MCS más elevadas (64-QAM 2/3) de las que tuvieron que ser consideradas en el caso original del PF4. Por ello el *overhead* real no supondría un 33% de la tasa de datos recibida en el enlace macro (Tabla 3.13. ) sino un 14,82% (para servir la tasa del enlace *access* basta, para una modulación 64-QAM 2/3, con un total de 4RBs reservados para el *backhaul*), dejando con ello mayor espectro disponible para los usuarios y mejorando la tasa que puede servirse en la celda (Tabla 3.15. ).

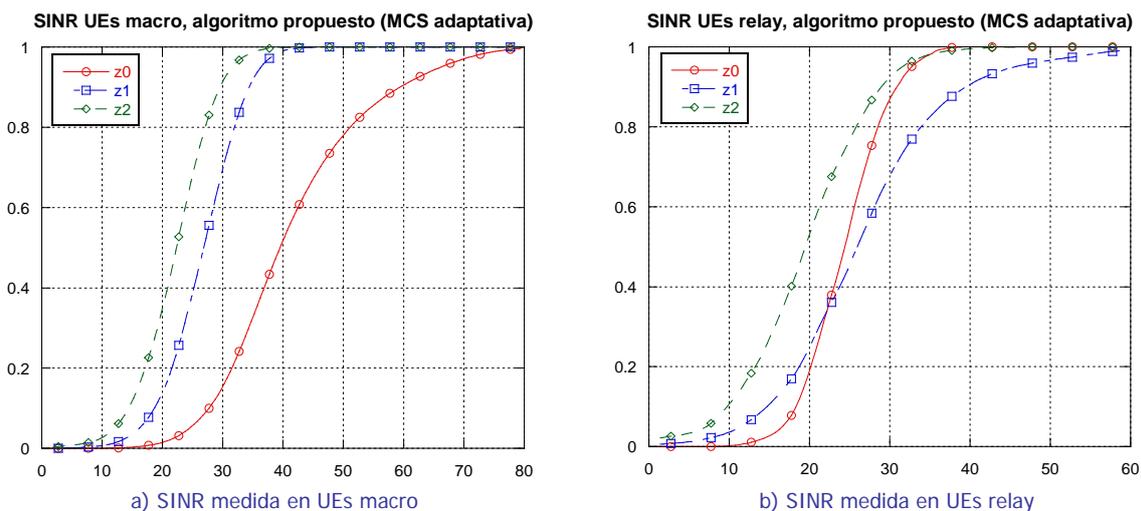
Algoritmo propuesto (16-QAM 1/2)	Tasa efectiva celda (Mbps)	UEs macro		UEs relay	
		6,449			1,942
		z0	4,492	z0	0,066
		z1	1,190	z1	1,048
		z2	0,766	z2	0,828
	Tasa efectiva recibida UEs (Mbps) teniendo en cuenta overhead real del 14,82%	5,493		1,942	
		z0	3,826	z0	0,066
		z1	1,013	z1	1,048
		z2	0,653	z2	0,828
	Tasa total (Mbps)	7,435			

**Tabla 3.15.** Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS fija 16-QAM 1/2, simulación relays half-duplex descontando overhead para el enlace backhaul

Si se implementa el algoritmo propuesto con MCS adaptativa en lugar de MCS fija se observa un incremento en la tasa servida en la red a la par que un aumento en la probabilidad de error en las transmisiones. Como se observa en la Tabla 3.16. el método propuesto permite la transmisión de un mayor volumen de tráfico servido en la red que cualquiera de los algoritmos analizados con anterioridad y con similares prestaciones (Figura 3.13 ).

Algoritmo propuesto adaptativo	BER (%)	UEs macro		UEs relay	
		0,697			3,139
		z0	0,140	z0	1,584
		z1	1,208	z1	1,942
		z2	3,619	z2	4,926
	BLER (%)	QPSK 1/2	6,6		
		16-QAM 1/2	4,55		
		16-QAM 3/4	2,26		
		64-QAM 2/3	0,68		
	Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	3,90	QPSK 1/2	13,47
		16-QAM 1/2	6,02	16-QAM 1/2	13,37
		16-QAM 3/4	16,29	16-QAM 3/4	28,27
		64-QAM 2/3	73,78	64-QAM 2/3	44,88
	Tasa efectiva celda descontando overhead real	8,565		3,170	
		z0	7,067	z0	0,108
		z1	1,538	z1	1,800
		z2	1,038	z2	1,261
	Tasa total UEs (Mbps)	11,735			

**Tabla 3.16.** Resultados obtenidos para el algoritmo propuesto, MCS adaptativa, relays half-duplex



**Figura 3.13 .** SINR obtenida para el método propuesto, MCS adaptativa, simulación relays half-duplex

A continuación se va a proceder a comparar el algoritmo propuesto con los resultados obtenidos en simulación para el caso de una infraestructura de red en la que no existen estaciones relay y todas las comunicaciones son directamente establecidas entre la estación base y los usuarios. Los parámetros de la simulación son idénticos a los utilizados para el caso de la red que opera en

modo relay. El algoritmo con el que se compara el método RRM propuesto es un reuso frecuencial fraccional (FFR: *Fractional Frequency Reuse*) en el que una determinada zona del espectro es dedicada a los usuarios del exterior de la celda (tercera parte del espectro), y el resto de ancho de banda servirá para dar servicio a los usuarios que se encuentran en mejores condiciones [22]. Dentro de ellos, como en el caso de simulaciones con relays, los usuarios intentarán en principio recibir servicio en recursos de los pertenecientes a su sector, existiendo la posibilidad de recibir en los de otro sector cuando ninguno de los de su zona les asegure una buena calidad del servicio.

Los resultados obtenidos en el caso de simulación sin relays para la primera de las situaciones en las que se emplea una modulación 16-QAM 1/2 y para el segundo de los casos en el que se utiliza MCS adaptativa se recogen en la Tabla 3.17.

Sistema en modo infraestructura estándar (16-QAM 1/2)	BLER (%)	0,386		Sistema en modo infraestructura estándar (MCS adaptativa)	BER (%)	0,763	
		z0	0,054			z0	0,161
		z1	0,387			z1	0,880
		z2	1,085			z2	1,580
	Tasa efectiva celda (Mbps)	6,455			Tasa efectiva celda (Mbps)	10,465	
		z0	2,867			z0	5,255
		z1	2,243			z1	3,179
		z2	1,345			z2	2,030
	Utilización MCS (%)				Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	2,19
						16-QAM 1/2	8,55
		16-QAM 3/4	23,82				
		64-QAM 2/3	65,44				

**Tabla 3.17.** Sistema de comunicaciones móviles en modo infraestructura estándar, MCS fija 16-QAM 1/2 y MCS adaptativa

Si se compara el caso del algoritmo propuesto con el caso de un sistema de comunicaciones en modo infraestructura estándar, se observa que un mayor número de usuarios puede ser servido en el mismo ancho de banda y con una calidad de servicio aceptable, aspecto positivo fundamentalmente en los usuarios de la zona exterior a la celda que podrán recibir más datos en mejores condiciones. La Tabla 3.18. incluye el volumen de tráfico correcto para el método propuesto y para el caso de un sistema de comunicaciones móviles en el que no existen relays.

Sistema	Modulación	Tasa efectiva celda (Mbps)
Modo relay algoritmo RRM propuesto	16-QAM 1/2	7,435
	MCS adaptativa	11,735
Sistema sin relays (infraestructura estándar)	16-QAM 1/2	6,455
	MCS adaptativa	10,465

**Tabla 3.18.** Resumen de los resultados obtenidos en el algoritmo propuesto y en un sistema de comunicaciones móviles en modo infraestructura estándar

Como puede observarse y comparando igualmente con la Tabla 3.11. , el algoritmo propuesto es el que mayor tasa efectiva permite transmitir en la red, manteniendo, como se ha comprobado anteriormente, buenos valores de SINR en cada uno de los enlaces y una probabilidad de error en la transmisión por debajo del umbral fijado, por lo que la necesidad de retransmisiones será mínima. En comparación con el caso de un sistema que opera en modo infraestructura estándar también se observa un mayor volumen de datos correctos transmitidos en la red. Evidentemente el uso de estaciones relay implicará un retardo temporal en la recepción de los datos, pero este hecho podrá verse compensado por las posibilidades de acceder a la red de los usuarios que en situación directa con la estación base no podían recibir servicio. Además los usuarios de la zona exterior de la celda que se encontraban en unas malas condiciones de canal en el enlace directo, poseen, en el caso de recibir servicio a través de los nodos relay, una mejor calidad que permite la utilización de modulaciones más elevadas y la posibilidad de que reciban mayor volumen de tráfico.

Sin embargo, un sistema de comunicaciones móviles en modo relay presenta una respuesta más compleja debido a las variaciones posibles en los usuarios y en la estimación de sus condiciones de canal, ya que pueden saltar de una entidad a otra en función de con cuál encuentran mejor enlace y pueden recibir un recurso que en la nueva situación actual no ofrece el comportamiento esperado. De este modo las posibles interferencias, son más inestables, y la probabilidad de error aumenta respecto

a un caso de comunicaciones móviles estándar. Aun así, en cuanto a tasa efectiva, teniendo únicamente en cuenta el volumen de tráfico que los usuarios reciben con éxito, compensa la introducción de estaciones relay con respecto al caso en que no existen.

Al comparar las gráficas de SINR (Figura 3.14 , Figura 3.15 ) se observa, como era de esperar, que los usuarios pertenecientes a las zonas exteriores de la celda han mejorado su situación al encontrarse más cercanos a las entidades posibles de proporcionarles servicio. Los resultados globales de todos los usuarios son similares, ligeramente mejores en el caso de utilización de relays, debido a que un mayor número de usuarios son capaces de utilizar MCS elevadas. La gran ventaja de la utilización de RSs es la posibilidad de los usuarios, que en el modo infraestructura estándar serían bloqueados, de acceder a la red y hacerlo en condiciones comparables a las de cualquier otro UE.

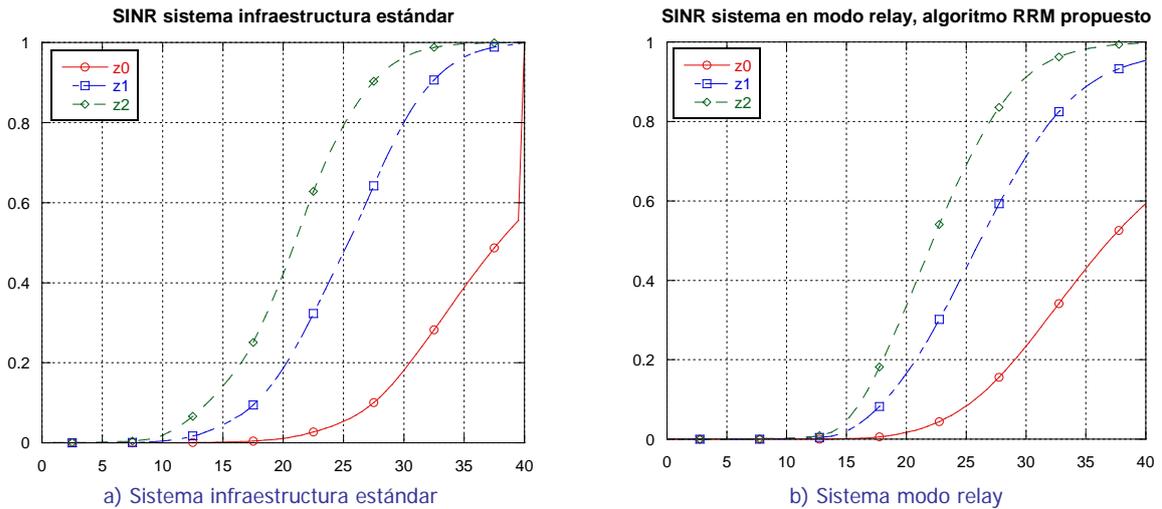


Figura 3.14 . SINR obtenida para un sistema de comunicaciones infraestructura estándar vs. sistema en modo relay, MCS fija 16-QAM 1/2

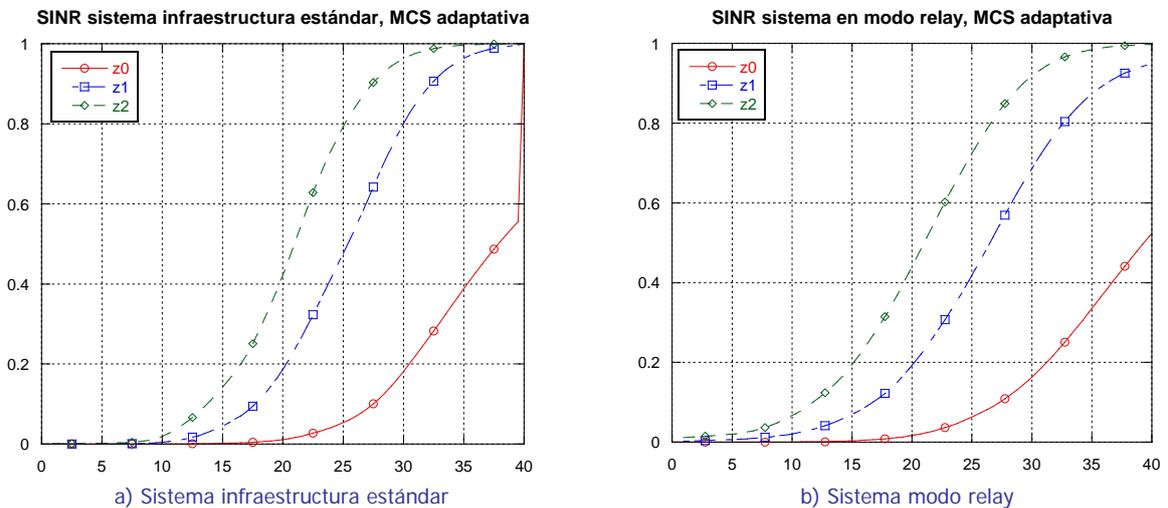


Figura 3.15 . SINR obtenida para un sistema de comunicaciones infraestructura estándar vs. sistema en modo relay, MCS adaptativa

En definitiva, con el mayor reuso de los recursos de la celda se permite incrementar ligeramente el número de subscriptores que soporta la red, y con la utilización de estaciones relay se permite una mejoría de las condiciones de los usuarios con problemas para recibir servicio en enlace directo con la estación base, teniendo en cuenta, por otro lado, que existen implicaciones negativas en una comunicación en varios saltos, como la necesidad de un gasto extra de recursos, que se ha visto compensada con el nuevo algoritmo propuesto al permitir la reutilización de los mismos recursos dentro de la propia celda sin perjudicar las prestaciones de la transmisión, o el gasto temporal o retardo que dicha comunicación multisalto implica.



# Conclusiones y Líneas Futuras

---

*En este capítulo se extraen las conclusiones derivadas del estudio realizado en el Trabajo Fin de Máster y se proponen líneas futuras de trabajo en relación a la problemática abordada.*

## 4.1. Conclusiones

Como se ha explicado en este Trabajo Fin de Máster, la opción de implementar nodos relays en la arquitectura de un sistema de comunicaciones móviles con objeto de mejorar la accesibilidad de los usuarios que se encuentran en el exterior de la celda, o más genéricamente hablando, de aquéllos que poseen una mala calidad de enlace directo con la estación base, y lograr una cobertura ubicua, trae consigo una amplia flexibilidad y posibilidades de implementación en función de las cuales habrá que estudiar el impacto que supone su adición en la red.

Tras realizar un estudio de las diferentes propuestas que se pueden encontrar en cuanto a tipo de estaciones relay, de las funcionalidades que alberga cada uno de ellos, y de determinadas implicaciones que aparecen como consecuencia de su utilización, la temática principal del Trabajo Fin de Máster ha sido analizar comparativamente diferentes esquemas de Gestión de Recursos Radio que pretenden una reutilización de los recursos eficiente en cuanto a la capacidad de subscriptores soportados en la red y la calidad del servicio que reciben.

Han sido estudiados de manera teórica y experimental diferentes algoritmos encontrados en la literatura, y sobre el que parece ofrecer un mejor compromiso entre reutilización de recursos y calidad de la transmisión obtenida en los enlaces, se ha propuesto una variante con objeto de mejorar las prestaciones logrando un mayor control de la interferencia.

Como conclusión general de todos los algoritmos de gestión analizados se extrae que es necesaria la reutilización de las mismas subbandas frecuenciales dentro de la propia celda para compensar el gasto extra de recursos que se deriva de las comunicaciones multisalto, pues si no la capacidad del sistema se ve drásticamente reducida. Si se consigue un esquema que soporte un número de subscriptores equivalente al de una red de comunicaciones estándar que utiliza el mismo ancho de banda, y de tal modo que la calidad de los enlaces no se vea degradada por el aumento de interferencias que puede suponer el nuevo algoritmo, puede lograrse una cobertura más homogénea, de modo que los usuarios que se encuentran en malas condiciones vean reemplazado su enlace directo con la estación base por un par de enlaces de mejores prestaciones y puedan acceder a la red con una alta probabilidad de éxito en la transmisión. Evidentemente la utilización de una comunicación en dos saltos implica un gasto temporal respecto al caso en que la comunicación es directa, pero este gasto se verá compensado por la accesibilidad a la red de una manera mucho más frecuente y por la alta probabilidad de no requerir una retransmisión de los datos, pues la probabilidad de éxito es elevada.

Comparando los esquemas de RRM en modo Relay, especialmente el algoritmo propuesto, que es el que proporciona un mejor comportamiento, con un sistema de comunicaciones estándar, se ha

observado que la calidad de los datos que reciben los usuarios es muy similar, pero como se menciona anteriormente se ofrece una mayor posibilidad de acceso a la red de aquéllos que en un sistema sin estaciones relay se verían bloqueados, o recibirían los datos con problemas y necesidad de retransmisión. Además se puede soportar un mayor número de usuarios en mejores condiciones que rentabilizan los efectos negativos que conllevan los sistemas multisalto, como el retardo o la necesidad de un mayor gasto de recursos.

## 4.2. Líneas Futuras

Sobre la temática de trabajo planteada puede definirse una línea de investigación novedosa sobre la que se puede estudiar un amplio abanico de posibilidades. En cuanto a la Gestión de Recursos Radio no es trivial qué algoritmo puede ofrecer un mejor compromiso entre todas las variables que entran a formar parte del estudio, por lo que es posible definir diferentes esquemas de RRM que deban ser comparados en búsqueda del comportamiento óptimo.

En cuanto al *scheduling* a implementar en este tipo de redes habría que analizar el impacto que supone la utilización de un método que, en contra del PF, que pretende una maximización de la tasa, se base en dar de una manera más justa los recursos a aquellos usuarios que peor accesibilidad al servicio están acumulando. De este modo se observaría en mayor grado los beneficios que puede suponer la utilización de los nodos relay, pues mientras en el esquema PF analizado, en una situación sin relays, los usuarios de la zona exterior están siendo bloqueados, en una situación en la que el algoritmo de *scheduling* sea un método más favorable a ellos se observaría un empeoramiento del comportamiento de la red, mientras que en la infraestructura en modo relay estos usuarios no supondrían un problema tan elevado, pues han logrado mejorar sus prestaciones. Así pues queda pendiente de estudio la comparación de ambas infraestructuras con diferentes algoritmos de priorización de los usuarios a la hora de recibir servicio.

Quizá la línea de trabajo más interesante respecto a los nodos relays, sería el análisis de un sistema con tráficos heterogéneos, en el que los usuarios pueden requerir servicios de diferentes características de QoS (*Quality of Service*). De este modo se comprobará en situaciones más realistas en las que los subscriptores no tienen siempre datos a transmitir, ni éstos son del mismo tipo, el impacto sobre una red estándar que supone la utilización de los relays.

Por último el número de estaciones relay a implementar en cada celda, la ubicación de las mismas, la potencia de transmisión y el criterio de enganche de los subscriptores a una u otra entidad para recibir servicio, son parámetros variables que afectarán de manera directa a la respuesta del sistema y con los que se puede jugar a la hora de buscar un comportamiento óptimo en la red. Incluso puede pensarse en la posibilidad de que no todas las celdas posean la misma distribución obteniendo una red de celdas heterogéneas.