



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

# GESTIÓN DE RECURSOS EN SISTEMAS DE MÓVILES 4G OFDMA CON DESPLIEGUE DE RELAYS

PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
MAYO 2011

**AUTOR:** GONZALO TEMES PELEGRÍN  
**DIRECTORA:** DRA. ÁNGELA HERNÁNDEZ SOLANA



Departamento de  
Ingeniería Electrónica  
y Comunicaciones  
**Universidad Zaragoza**



# GESTIÓN DE RECURSOS EN SISTEMAS DE MÓVILES 4G OFDMA CON DESPLIEGUE DE RELAYS.

## *Resumen*

Las redes de nueva generación tienen como objetivo ofrecer altas tasas de transferencia independientemente de la ubicación del usuario. En los sistemas celulares actuales una única entidad, la estación base, se encarga de dar servicio a todos los usuarios de una misma celda. Esta filosofía presenta casos críticos a la hora de ofrecer un servicio apropiado a aquellos usuarios ubicados en el exterior de la celda, ya que éstos disponen de peores condiciones de canal. Estos móviles requieren de un mayor número de recursos o de una mayor potencia para obtener una SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) adecuada, lo cual, incrementa el nivel de interferencia sobre las celdas adyacentes.

Para lograr mejores condiciones de canal y mejorar la capacidad de la celda se puede optar por reducir la distancia del enlace radio, implantando nuevas estaciones base, aunque esto supondría un aumento excesivo en el coste de infraestructura. 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, que sirvan de soporte auxiliar para los casos en los que el enlace directo entre una estación base y un usuario no sea lo suficientemente bueno como para garantizar la calidad del servicio. Una posible solución sería el despliegue de nodos relay, que podrían entenderse como pequeñas estaciones base con menor autonomía, 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.

Los sistemas relay multisalto se presentan como una alternativa interesante para mejorar la cobertura y capacidad de las nuevas redes móviles de banda ancha OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), sin embargo, la inclusión de los mismos requiere una gestión de recursos inteligente que compense el gasto extra ocasionado por ellos, ya que, en este tipo de despliegue, el enlace directo entre una estación base y un usuario se vería reemplazado por dos enlaces radio (enlace "backhaul" entre la estación base-relay, y enlace "access" entre relay-usuario).

En este proyecto fin de carrera se analizan las implicaciones del uso de este tipo de despliegue en el DownLink de una red de banda ancha OFDMA, tipo LTE (Long Term Evolution) de 3GPP, con duplexado FDD (Frequency Division Duplex), considerando los relays como elementos fijos de la infraestructura y asumiendo que el despliegue se efectúa sobre la misma banda frecuencial que las comunicaciones estándar. Particularmente, en la evaluación de distintos esquemas de coordinación y asignación de recursos originales entre los enlaces que comparten la misma estructura de trama, en un escenario multicelular. Las estrategias serán analizadas en función de la ganancia de capacidad y del nivel de interferencia generada con objeto de conseguir esquemas de reuso más agresivos que compensen el gasto extra requerido sin perjudicar las prestaciones de la red.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1: Introducción .....	9
Capítulo 2: Modo Relay.....	13
2.1 Requisitos funcionales.....	16
2.2 Opciones de implementación para el relay.....	17
2.3 Tipos de soporte para el modo relay .....	18
2.4 Estructura de trama para el modo de funcionamiento no transparente.....	20
2.4.1 Recursos "extra" necesarios en el modo relay. ....	23
2.5 Escenario y objetivos específicos del PFC.....	24
Capítulo 3: Análisis Propuesta y Evaluación de las Estrategias de RRM .....	25
3.1 Modelo de Sistema.....	26
3.2 ALGORITMOS EXISTENTES. ....	29
3.2.1 Algoritmo PF7 (Partition Factor 7): .....	31
3.2.2 Algoritmo PF4 (Partition Factor 4): .....	33
3.2.3 Algoritmo PF3: .....	36
3.3 ALGORITMOS PROPUESTOS.....	38
3.3.1 Despliegue de 6 Relays Configuración 1: .....	39
3.3.2 Despliegue de 6 Relays Configuración 2: .....	41
3.3.3 Despliegue de 9 Relays configuración 1:.....	44
3.3.4 Despliegue de 3 Relays configuración 1:.....	46
3.4 Comparativa de los distintos escenarios: .....	48
Capítulo 4: Conclusiones y Líneas Futuras.....	55
REFERENCIAS.....	57
Anexo A: CONDICIONES DE EVALUACIÓN .....	59
Anexo B: TIPOS DE RELAY.....	63

## TABLAS

<b>Tabla 1</b> SINR umbral y tasa de datos para cada MCS .....	28
<b>Tabla 2</b> PF7 enganche RSSI.....	33
<b>Tabla 3</b> PF4 enganche RSSI.....	35
<b>Tabla 4</b> PF3 enganche RSSI.....	37
<b>Tabla 5</b> Despliegue de 6 relays configuración 1, enganche RSSI. ....	40
<b>Tabla 6</b> Despliegue de 6 relays configuración 2, enganche RSSI. ....	42
<b>Tabla 7</b> Despliegue de 6 relays configuración 2, enganche SINR .....	43
<b>Tabla 8</b> Despliegue de 9 relays configuración 1, enganche RSSI. ....	46
<b>Tabla 9</b> Despliegue 3 relays configuración 1, enganche RSSI. ....	48
<b>Tabla 10</b> Rendimiento por celda de los distintos escenarios y ganancia respecto al caso estándar. ....	52
<b>Tabla A.1</b> Modelos de propagación multicamino.....	59
<b>Tabla A.2</b> Parámetros generales de las simulaciones.....	60
<b>Tabla A.3</b> Parámetros generales de configuración de antena .....	61
<b>Tabla A.4</b> Parámetros dependientes del scheduling y del servicio.....	61
<b>Tabla A.5</b> Parámetros del modelo de CQIs. ....	62
<b>Tabla A.6</b> SINR umbral y tasa de datos para cada MCS.....	62
<b>Tabla B.1</b> Resumen de opciones de implementación del relay.....	64

## FIGURAS

<b>Figura 1</b> Enlaces soportados en un sistema de comunicaciones móviles en modo relay. .....	13
<b>Figura 2</b> Modo de funcionamiento no-transparente .....	18
<b>Figura 3</b> Modo de funcionamiento transparente .....	20
<b>Figura 4</b> Multiplexación comunicaciones backhaul, access. ....	21
<b>Figura 5</b> RBs disponibles en el sistema.....	27
<b>Figura 6</b> Estructura de la celda simulada .....	27
<b>Figura 7</b> Asignación ordenada en la subbanda interior (FFRopa).....	28
<b>Figura 8</b> Subtrama backhaul Opción 1.....	31
<b>Figura 9</b> Subtrama backhaul Opción 2.....	31
<b>Figura 10</b> Configuración PF7, Subtrama Normal.....	32
<b>Figura 11</b> Configuración PF4, Subtrama Normal.....	34
<b>Figura 12</b> Configuración PF3, Subtrama Normal.....	36
<b>Figura 13</b> Multiplexación de comunicaciones en las subtramas A y B.....	38
<b>Figura 14</b> Despliegue de 6 relays configuración1. ....	40
<b>Figura 15</b> Despliegue de 6 relays configuración 2. ....	42
<b>Figura 16</b> Despliegue de 9 relays configuración 1. ....	45
<b>Figura 17</b> Despliegue de 3 relays configuración 1. ....	47
<b>Figura 18</b> Función de distribución para los usuarios enganchados a las R_BS .....	49
<b>Figura 19</b> Función de distribución para los usuarios enganchados a los RS.....	50
<b>Figura 20</b> Función de distribución para los usuarios de la zona 0. ....	51
<b>Figura 21</b> Función de distribución para los usuarios de la zona 1. ....	51
<b>Figura 22</b> Función de distribución para los usuarios de la zona 2. ....	52
<b>Figura 23</b> Comparación de la tasa neta para las distintas configuraciones. ....	53

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

3GPP	↔	Third (3 <sup>rd</sup> ) Generation Partnership Project
ACK	↔	Acknowledgment
AF	↔	Amplify and Forward
AMC	↔	Adaptive Modulation and Coding
ARQ	↔	Automatic Report Request
CQI	↔	Channel Quality Indicator
DF	↔	Decode and Forward
DL	↔	Downlink
FD	↔	Frequency Division
FDD	↔	Frequency Division Duplex
FDM	↔	Frequency Division Multiplex
FFR	↔	Fractional Frequency Reuse
FRF	↔	Fractional Reuse Factor
HARQ	↔	Hybrid Automatic Report Request
ICIC	↔	InterCarrier Interference Coordination
ID	↔	Identity
IEEE	↔	Institute of Electrical and Electronic Engineers
L1	↔	Layer 1
L2	↔	Layer 2
L3	↔	Layer 3
LOS	↔	Line of Sight
LTE	↔	Long Term Evolution
LTE-A	↔	LTE-Advance
MAC	↔	Medium Access Control
MCS	↔	Modulation and Coding Scheme
NACK	↔	Negative Acknowledgment
NLOS	↔	Non Line of Sight
OFDMA	↔	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PF	↔	Partition Factor
PF	↔	Proportional Fair
PFC	↔	Proyecto Fin de Carrera
PSR	↔	Path Selection Rule

QoS	↔	Quality of Service
RAN	↔	Radio Access Network
R_BS	↔	Relay Base Station
RB	↔	Resource Block
RF	↔	Radio Frequency
RRC	↔	Radio Resource Control
RRM	↔	Radio Resource Management
RS	↔	Relay Station
RSSI	↔	Received Signal Strength Indication
Rx	↔	Recepción
SINR	↔	Signal to Interference and Noise ratio
SR	↔	Scheduling Request
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



# Capítulo 1: Introducción

En los últimos años la proliferación de dispositivos móviles así como el rápido desarrollo de nuevas aplicaciones de audio y video han provocado un incremento exponencial en el tráfico cursado por las redes celulares. Este hecho ha cambiado el enfoque sobre este tipo de redes, convirtiéndolas en redes de conmutación de paquetes en las que cualquier tipo de información puede ser transmitida.

En la siguiente generación de redes móviles, los usuarios esperan tener una alta tasa de transferencia para poder disfrutar de los nuevos contenidos multimedia, independientemente de su localización en la celda, mientras que los operadores móviles deberán incrementar la capacidad de cada celda, asumiendo el menor gasto posible.

Este proyecto se centra en los estándares que contemplan movilidad total, marco en el que se pone de manifiesto un uso generalizado de técnicas OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [1], gracias a sus beneficiosas características en eficiencia espectral, robustez frente a la propagación multicamino y flexibilidad en el scheduling de recursos.

Para optimizar la capacidad y obtener una buena calidad de servicio (Quality of Service, "QoS") es importante contar con capas físicas potentes y flexibles, pero no es menos importante el diseño de técnicas eficientes de gestión y asignación de recursos. La alta demanda de capacidad conlleva la apuesta por despliegues celulares con esquemas de reuso frecuencial agresivos (habitualmente reuso unidad), donde para combatir la interferencia inter-celular e inter-sector y garantizar la calidad de las transmisiones de los usuarios se requiere el diseño de estrategias optimizadas de gestión de potencia, interferencia y asignación de recursos. Estas técnicas aún son más relevantes para aquellos usuarios situados en los límites de las celdas (donde el nivel de interferencia recibido es mayor).

En este contexto, las propuestas existentes de coordinación de interferencias [2] basadas en la aplicación de estrategias de partición y reuso frecuencial son abundantes, aunque todavía se está lejos de una solución óptima.

Aún con el uso de estas nuevas técnicas, tanto de gestión de recursos, como de acceso al medio, el despliegue celular estándar sigue presentando un punto débil a la hora de otorgar servicio a cualquier usuario presente en la célula, debido a que las condiciones de canal de una estación móvil dependen de su situación con respecto a la estación base que le proporciona servicio. Un usuario cercano a la estación base tendrá un ratio superior de señal a ruido más interferencia, que uno que se encuentre en el exterior de

la celda, lo que a la postre determinará la eficiencia espectral, es decir, el número de recursos necesarios para dar servicio a cada uno.

En este ámbito de desarrollo global de los sistemas avanzados de banda ancha, queda claro que la accesibilidad y provisión eficiente y de calidad de los servicios multimedia demandados se ven particularmente limitados en las zonas exteriores de la celda, donde se consigue una baja eficiencia espectral, así como en zonas urbanas con alta densidad de tráfico, donde la capacidad existente es insuficiente.

Por ello, el interés de la industria es creciente entorno al despliegue de nodos de acceso de menor coste y potencia, que operan bajo la cobertura de las habituales macroceldas y que tienen como misión mejorar la cobertura y la capacidad global de la celda. Existen distintos tipos de soluciones basadas en el despliegue de relays, picoceldas y femtoceldas, todas ellas fundamentadas en la reducción de la distancia entre la estación base y los usuarios con malas condiciones de canal, de tal forma que éstas se vean mejoradas.

El despliegue de picoceldas es una de las estrategias más extendidas, consiste en reducir el tamaño de las celdas incrementando la densidad de estaciones base, de este modo el número de recursos disponibles se mantiene en un área menor, lo que deriva en un aumento de la capacidad. Sin embargo el beneficio de esta medida es limitado debido al coste excesivo que conlleva el despliegue de las estaciones base, (pues el operador de servicio no solo debe pagar por el emplazamiento de las antenas sino también por la conexión backhaul que ha de ser de tipo cableada).

Las femtoceldas tienen un área de influencia menor que las picoceldas y suelen ser utilizadas en el interior de edificaciones, donde el nivel de señal de la estación base es bajo. Al igual que en el caso de las picoceldas es necesaria una conexión fija para implementar el enlace backhaul, si bien, su ubicación en edificaciones nos permite aprovechar la infraestructura fija existente en las mismas. Presentan como diferencias la capacidad de autoconfiguración, auto optimización y despliegue no planificado, debido principalmente a que el rango de cobertura de las femtoceldas es menor.

Los relays [3, 4, 5] presentan la gran ventaja de que el enlace backhaul puede ser implementado mediante tecnología wireless. Este hecho, aporta una gran flexibilidad en la ubicación de estas estaciones, así como un rápido crecimiento de la red debido al menor coste del despliegue, sin embargo éste habrá de realizarse con meticulosa planificación, ya que los recursos disponibles en la celda, deberán ser utilizados tanto por las estaciones base como por los nodos relay.

La solución adoptada para este Proyecto Fin de Carrera (PFC), es la basada en la inclusión del modo relay sobre las redes celulares OFDMA, que constituye una solución prometedora para la siguiente generación de comunicaciones móviles, donde se pretenden altas tasas de transferencia independientemente de la ubicación del usuario. Esta solución ha sido adoptada en los estándares 802.16j-WiMAX [6] y en LTE [7] promovidas por el IEEE y el 3GPP respectivamente, siendo las especificaciones propuestas por esta última las escogidas, como base, para la realización de este estudio.

Este nuevo escenario, al que es habitual referirse como red heterogénea, no está exento de la resolución de retos y problemas técnicos relevantes, tanto en la gestión de los recursos radio [8], como en la definición de estrategias de planificación y despliegue adecuados que permitan realmente alcanzar dichos objetivos de mejora.

El modo relay posibilita la comunicación entre terminales utilizando un nodo intermedio (estación relay) como acceso a la infraestructura (estación base), siendo posible que los enlaces entre la estación base que soporta el modo (R\_BS) y los relays (RS) (enlace

backhaul) operen en la misma banda frecuencial que los enlaces directos entre la R\_BS y los terminales móviles (UEs) (enlace macro) y entre los RS y los UEs (enlace de acceso al relay). La mejora de capacidad, que solo se producirá en el supuesto de que el enlace macro (UE a R\_BS) se remplace por un par de enlaces de mayor calidad sobre los cuales se puedan soportar esquemas de modulación y codificación (MCS) de orden superior, puede quedar lastrada por la necesidad de consumo de recursos adicionales por ambos enlaces. Por este motivo, en el caso de los despliegues con relays, se requiere no solo el desarrollo de estructuras MAC, capaces de garantizar la coexistencia de ambos accesos sobre la misma estructura de trama de forma transparente para el terminal y la consiguiente adaptación de los mecanismos de gestión de transmisiones a nivel de enlace, sino el desarrollo de estrategias de reparto y reuso frecuencial entre enlaces, que permitan alcanzar de forma efectiva esos objetivos de mejora.

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es la propuesta de nuevas estrategias de repartición de recursos radio, en escenarios con 3, 6 y 9 relays desplegados por celda, con un reuso frecuencial agresivo, manteniendo el nivel de interferencia lo más controlado posible. Se trata de simular y analizar los resultados de los nuevos algoritmos propuestos para observar si existe un incremento en la capacidad efectiva del sistema, así como de verificar si el reparto de servicio es más homogéneo en la celda.

El resto del PFC se encuentra distribuido de la siguiente manera:

En el segundo capítulo se explica el impacto que la inclusión del modo relay provoca sobre la infraestructura estándar y se describen las características de los nodos relays utilizados en este proyecto. A continuación, en el tercer capítulo, se procede al análisis tanto de manera teórica como experimental, mediante el uso de una plataforma en C++ creada con tal objeto, de los distintos algoritmos de repartición de recursos encontrados en la literatura. Posteriormente se realiza lo mismo con los algoritmos innovadores propuestos en este PFC, incluyendo propuestas con 3, 6 y 9 relays.

Seguidamente se comparan todos los algoritmos descritos anteriormente en términos de su función de distribución SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) y de la tasa efectiva cursada en la celda.

Para finalizar se presentan las conclusiones y las futuras líneas de actuación.





Al mejorar las condiciones de canal para los usuarios limítrofes, se garantiza una repartición de los recursos más homogénea, pudiendo otorgar una buena calidad de servicio (QoS) independientemente de la ubicación del usuario. Además debido al incremento en el número de entidades radio presentes en la célula, así como la menor potencia de transmisión de éstas, sería posible, a priori, obtener un factor de reuso frecuencial superior a la unidad, lo que supone que los mismos recursos pueden ser utilizados en más de una ocasión en la misma celda. No obstante, se requiere el diseño de estrategias eficientes de gestión de interferencias, dirigidas a coordinar las asignaciones y reuso de recursos en las distintas entidades, manteniendo limitado el nivel de interferencia.

Tanto la disminución de la distancia existente entre algunos usuarios y la estación base, así como las nuevas estrategias de Radio Resource Management, han de concluir en la consecución del objetivo buscado: incrementar la capacidad global del sistema y otorgar un servicio más homogéneo.

La inclusión de los nuevos nodos relay sobre las redes estándar genera la aparición de dos nuevos enlaces que se suman al enlace de "acceso directo" (denominado enlace "macro" en este PFC) entre la estación base y el usuario ( $R_{BS} \leftrightarrow UE$ ), utilizado para las comunicaciones en modo estándar (Figura 1). Estos dos enlaces son el enlace "backhaul" y "access relay" y constituyen los dos saltos obligatorios para poder cursar la comunicación en modo relay, en una red multisalto:

- Enlace "backhaul" ( $R_{BS} \leftrightarrow RS$ ): Se trata de un enlace punto a punto cuya misión es comunicar a la estación base con el nodo Relay o viceversa, dependiendo de si se habla del DownLink(DL) o UpLink(UL) respectivamente. Una de las grandes ventajas de los nodos relay frente a las picocélulas y femtoceldas, es que este enlace es implementado con tecnología wireless, lo que implica un menor coste en infraestructuras así como una mayor velocidad de despliegue de los mismos. El inconveniente del uso de tecnología inalámbrica reside en la necesidad de reservar una cantidad de recursos radio para dicho cometido. La inhabilitación del enlace provocará la inutilización del relay al completo, por ello es esencial en este tipo de despliegues garantizar su correcto funcionamiento mediante la pre planificación del mismo y el uso de antenas directivas en los relays. Este enlace constituye uno de los dos saltos para todos aquellos móviles que utilicen el modo relay.
- Enlace "access relay" ( $RS \leftrightarrow UE$ ): También denominado "access", es un enlace punto a multipunto cuya misión es comunicar a los usuarios con los nodos relay. A diferencia del backhaul, este enlace nunca podrá ser pre planificado pues los usuarios se encuentran en condiciones de movilidad total, y por tanto, la calidad del mismo dependerá de las condiciones radioeléctricas entre el relay y el usuario. Constituye el otro salto junto con el enlace backhaul para llevar a cabo la comunicación en modo relay o comunicación en dos saltos. El enlace debe ser implementado sobre la misma banda frecuencial utilizada en el enlace macro, para que los usuarios móviles puedan tener acceso transparente al mismo.

Ha de tenerse en cuenta que en ningún caso es posible establecer comunicaciones en modo relay entre terminales móviles utilizando exclusivamente las estaciones relay, es decir, sin la intervención de una estación base. Por ello los usuarios que reciban el servicio mediante el uso de este modo lo harán en dos saltos. Por ejemplo si un usuario se encuentra enganchado a una estación relay y espera recibir información, ésta deberá de ser transmitida primero de la  $R_{BS}$  al  $RS$ , y posteriormente el  $RS$  la transmitirá para que el usuario la reciba. Así pues es evidente que el modo relay conlleva un retardo en la comunicación respecto al caso estándar. Además es clara la necesidad de una cantidad de recursos radio para cada uno de los enlaces, por lo que

un usuario que utilice las estaciones relays como medio de acceso a la red, deberá sumar a los recursos utilizados por el enlace "access relay" un número de recursos extra para la implementación del enlace backhaul.

Por estos motivos el modo relay debe utilizarse solo cuando la mejora producida en las condiciones de canal es elevada, en cualquier otro contexto la comunicación deberá ser cursada en modo estándar.

Existe la posibilidad de que los recursos "extra" utilizados por el enlace backhaul, se encuentren en la misma banda frecuencial en la que trabaja la parte radio del sistema de comunicaciones (*Relays "inband"*), o bien se utilicen nuevos recursos dedicados en exclusiva para este cometido (*Relays "outband"*). Es de gran relevancia remarcar que en este PFC el enlace backhaul siempre hará uso de los recursos limitados de los que disponga la celda (Relay inband), lo que a priori supondrá, o bien, un aumento de la interferencia, o bien, una pérdida de capacidad en el sistema.

Queda claro que el aumento de capacidad del sistema pasa por la reutilización de los recursos disponibles, de no ser así, este tipo de redes soportaría, en un momento dado, un número de usuarios menor, hecho que debe evitarse a toda costa. Un mayor factor de reuso frecuencial en la celda produce un incremento en el nivel de interferencia, que deberá gestionarse a fin de alcanzar los beneficios prometidos por estas redes.

Para el modo relay, el escenario de interferencia no solo se ve modificado por el hecho de tener que hacer un mayor uso de los mismos recursos, sino que además las nuevas entidades constituyen nuevos generadores de interferencia que origina nuevos casos respecto al modo estándar. Centrándonos en el DL de las redes multisalto, (enlace sobre el cual se han obtenido y analizado todos los resultados de este PFC), se consideran como entidades interferentes todas aquellas que se encuentren transmitiendo (R\_BS, RS), mientras que las entidades que se ven afectadas son aquellas que se encuentren en modo recepción (RS, UE). Los distintos casos de generación de interferencias en este nuevo escenario son:

- 1) Interferencia de las transmisiones de la R\_BS (macro o backhaul) sobre los UEs servidos por otras R\_BS. Lo identificamos como R\_BS → UE.
- 2) Interferencia de las transmisiones macro o backhaul de una R\_BS sobre RS asociados a otras estaciones base. Lo identificamos como R\_BS → RS (modo rcx).
- 3) Interferencia de las transmisiones de la R\_BS (macro o backhaul) sobre los UEs servidos por un RS. Lo identificamos como R\_BS → UE.
- 4) Interferencia de las transmisiones de un RS sobre la recepción del enlace backhaul en otros RS asociados a la misma R\_BS o a otras R\_BSs. Lo identificamos como RS (modo trx) ↔ RS (modo rcx).
- 5) Interferencia de las transmisiones de un RS sobre los UE servicios por la R\_BS (UE macro) o sobre los UEs servidos por otros RSs. Lo identificamos como RS (modo trx) ↔ UEs (macro o relay).

Si bien el primero de los casos se encuentra presente en las redes convencionales, los otros cuatro casos son únicos y originados por la inclusión de los relays. Parece evidente que este nuevo escenario de interferencia potencial, presente en las redes multisalto, requiere de un diseño más eficiente de las estrategias de coordinación de recursos, particularmente cuando el despliegue del modo relay se efectúa utilizando la misma banda frecuencial que las comunicaciones estándar. En cualquier caso, la presencia de uno u otro tipo de interferencia, de los casos enumerados anteriormente, estará condicionada por el tipo de implementación de los nodos relay, del tipo de multiplexado aplicado entre las transmisiones macro, access relay y backhaul, de la

propia estrategia de coordinación de recursos aplicada y del tipo de scheduling aplicado.

En este contexto es donde toma valor la investigación y elaboración de nuevas estrategias de repartición de recursos, en las que se trata de reutilizar al máximo los recursos de los que se dispone, controlando de la mejor manera posible la interferencia generada. Sin estos nuevos algoritmos la consecución de un aumento en la capacidad por parte de las redes multisalto es muy cuestionable.

La actividad de investigación de las redes multisalto, implica una revisión y análisis previo de las opciones de implementación para los nuevos nodos relays. Los distintos modos de uso y posibles escenarios de despliegue condicionan los requisitos funcionales, modos de funcionamiento y las soluciones de implementación de las estaciones relay. Consecuentemente la variedad de Relays existentes es amplia.

Si bien no es objeto de este PFC el análisis detallado de las distintas implementaciones posibles del relay, sí que es interesante apuntar como su modo trabajo varía dependiendo de los niveles implementados.

A continuación se describen brevemente las características más relevantes de las distintas alternativas para la implementación de estos nodos, centrándonos posteriormente en los relays identificados como tipo 1, dentro del estándar 3GPP y en los que se centra este proyecto.

Como paso previo se enumeran los requisitos funcionales exigidos al modo relay en este PFC:

## 2.1 Requisitos funcionales

La introducción del modo relay exige dos requisitos funcionales de alto nivel con impacto en el control de acceso al medio: Por un lado, la estructura MAC tiene que ser capaz de soportar las comunicaciones tanto entre estación base y relay, como entre relay y terminal móvil; mientras que por otro, dicha estructura debe ser tal que todo lo referente al relay sea transparente para los usuarios que no soporten el modo relay, ya que es imprescindible la coexistencia en el mismo sistema de los dos tipos de terminales, con y sin soporte relay.

Adicionalmente se incluyen otros requisitos como:

- El nodo relay debe tener suficiente potencia de transmisión y ganancia de antena para mejorar la cobertura, pero menor que la de la estación base.
- El nodo relay debe operar en la misma banda frecuencial que las comunicaciones BS/R\_BS a UE, para ahorrar espectro.
- El nodo relay es fijo. No soporta movilidad total.
- No se soportan más de dos saltos.
- Los nodos relay RS no generan tráfico de usuario, pero pueden generar mensajes de control y de gestión necesarios para el funcionamiento del modo relay.
- Se pueden soportar mecanismos de compartición de canales entre enlaces de acceso macro, backhaul y access relay. El soporte de este tipo de mecanismo requiere un control muy estricto de la interferencia.
- El soporte de mecanismos de ARQ y HARQ con los móviles vía nodo relay.
- Soporte de scheduling dinámico de los recursos en el acceso relay. El scheduler tiene la misión de asignar los recursos disponibles a los distintos usuarios, y

efectuar la elección del esquema de modulación y codificación (MCS) a utilizar. Dependiendo de donde se realice esta decisión, es decir, de la ubicación del scheduler, nos podemos encontrar con dos tipos scheduling distintos:

*Scheduling centralizado:* en este supuesto solo existe un scheduler por celda y está situado en la estación base. Su principal ventaja radica en la mayor diversidad de recursos a la hora de elegir, si bien esto puede derivar en un menor control sobre la interferencia generada. Además existe un incremento de tráfico en el backhaul, debido a que debe existir comunicación entre el RS su R\_BS para realizar la petición y asignación de recursos, estas transmisiones no solo consumen capacidad de la celda sino que introducen un retardo apreciable en las comunicaciones.

*Scheduling distribuido:* En el scheduling distribuido, el propio relay será el que asigne recursos a los usuarios a los que va a dar servicio dentro de una zona preasignada, que puede ser estática o modificada por la R\_BS en base a medidas promedio del canal o de carga de tráfico. Las ventajas son una menor carga de señalización a través del enlace directo y un scheduling más preciso y más simple en ambos nodos. Las desventajas son que los recursos no utilizados por un RS no pueden ser utilizados por otros RSs y que la diversidad a la hora de realizar la asignación de los recursos es menor. Este tipo scheduling está asociado a relays que deben ser capaces de transmitir sus propias señales de control, es decir, relays de tipo no transparentes (L2 o L3), para poder informar al usuario de la decisión efectuada.

## 2.2 Opciones de implementación para el relay.

Existe una gran diversidad de opciones de implementación para el relay, atendiendo al nivel de la pila de protocolos en el que el tráfico de usuario es retransmitido y a las funciones habilitadas en el plano de control.

- Los *relays de nivel 1* (L1 o repetidor): trabajan en modo "Amplify-and-Forward"(AF), amplificando la señal recibida y volviéndola a transmitir, al igual que un simple amplificador analógico. Su principal ventaja es que el retardo que introducen es mínimo. Ya que el RS retransmite la señal sin introducir un retardo sustancial (unos pocos microsegundos), existe aislamiento RF (Radio Frequency) y el RS puede transmitir y recibir simultáneamente sobre los mismos recursos frecuenciales. Sin embargo al no realizar ningún proceso sobre la señal, tanto el ruido como la interferencia se ven amplificados, lo que provoca una degradación de la SINR y consecuentemente del throughput del sistema.

- Los relays de nivel 2 o 3 (L2 o L3): trabajan en modo "Decode and Forward"(DF). En este tipo de relay la información es decodificada, procesada y codificada, con lo que se origina un retardo apreciable (mayor de un Time Transmission Interval "TTI"). A diferencia de los relays L1, el ruido y la interferencia que puedan existir en la entrada no son retransmitidos por el nodo relay. El reenvío se produce a nivel 2 y 3 respectivamente. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que existen un número importante de implementaciones diferentes dependiendo del número de funcionalidades de nivel L2 (corrección de errores, HARQ, scheduling dinámico incluida la adaptación de la modulación y codificación (AMC) en función de las condiciones de canal) y L3 (funciones de gestión de recursos radio (RRC), incluida la gestión de la movilidad). Hay que tener en cuenta que el hecho de que el relay L2 reenvíe la información a nivel 2 no implica que implemente toda la funcionalidad de nivel 2.

Al analizar los distintos escenarios de despliegue potencial de relays (áreas rurales, cobertura en zonas urbanas con alta densidad de usuarios (Urban Hot Spot), en puntos de sombra, Cobertura en zonas interiores con alta densidad de usuarios (Indoor Hot Spot), despliegues de emergencia o de redes temporales, es fácil concluir la conveniencia de usar relays L2 o L3. En líneas generales, el uso de un repetidor L1 no es adecuado, ya que amplifica también el ruido y la interferencia, provocando una degradación de la SINR.

Por otra parte, en varios de estos escenarios interesa aplicar estrategias de nivel MAC, corrección de errores, HARQ, scheduling dinámico para proporcionar un tratamiento diferenciado a los usuarios en función de las condiciones que experimenten. No obstante, es posible establecer, de forma genérica, las ventajas e inconvenientes de determinados tipos de configuración para este tipo de relays (L2 o L3) en función del escenario de uso. En el anexo B se incluye una breve descripción.

Para todos los tipos de relays, uno de los aspectos que distingue las diferentes soluciones de implementación práctica es la operación half duplex o full dúplex.

### 2.3 Tipos de soporte para el modo relay

Dado que la variedad de Relays existentes es muy amplia, el 3GPP ha considerado dos grandes tipos de relays, Tipo 1 y Tipo 2 [9, 10, 11], sobre los que concretar las propuestas de nivel MAC y gestión de recursos a nivel de enlace. Este PFC considera exclusivamente el despliegue de relays tipo 1, concretándose, a continuación, las características específicas más relevantes de este tipo de relays, conjuntamente con un breve apunte a las características de los relays tipo 2.

**Relay “no transparente” (Tipo 1).** Los UEs son conscientes de la presencia del relay, lo que implica que el RS funciona, desde el punto de vista del UE, como una estación base más o menos compleja, dependiendo de las funcionalidades consideradas en el plano de control y del nivel en el que se produce la retransmisión de los datos, dentro del plano de usuario. Cada RS tiene su propio identificador de celda (cell ID) y transmite sus propias señales de referencia, canales de control, de sincronización y broadcast de información de sistema.

El coste puede ser alto pero permite un despliegue rápido de la red para incrementar la capacidad en una determinada zona o ampliar la cobertura, pudiendo quedar el UE bajo la cobertura de un relay pero no de la estación base (Figura 2).

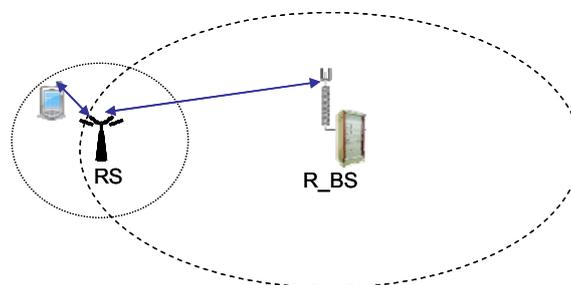


Figura 2 Modo de funcionamiento no-transparente

A nivel funcional, el RS puede ser un relay de nivel L2 o L3. El usuario, podrá tener enlace directo con la estación base o con el nodo relay (como vía para alcanzar la R\_BS) para cursar su comunicación, pero no con ambos simultáneamente. El UE recibirá, cuando esté conectado a través del RS, las transmisiones de datos y la información de control (generada en el propio RS o retransmitida de la R\_BS)

directamente del relay. Recibirá información de scheduling y HARQ y mandará también al mismo directamente señalización de control en el UpLink (SR, CQI, ACK). Por lo tanto, admite el soporte de scheduling tanto centralizado como distribuido. Como premisa de partida se asume que alberga la funcionalidad HARQ, así que el aspecto diferenciador más relevante desde el punto de vista del nivel de enlace será si alberga o no la funcionalidad de scheduling. Se considera más adecuado el scheduling distribuido, ya que proporciona al relay flexibilidad para gestionar los recursos radio y proporcionar diferentes niveles de calidad de servicio. Por otra parte, permite una adaptación más rápida a las condiciones de canal y reduce el overhead asociado al canal de control entre la R\_BS y el RS. Un aspecto a favor del scheduling centralizado es que, a priori, la R\_BS puede proporcionar acceso a los UEs en cualquiera de los recursos frecuenciales, mientras que en el distribuido, la flexibilidad del scheduling, por norma general, se restringe a un conjunto de recursos pre-asignados por la R\_BS al RS. La elección entre ambos esquemas aplica fundamentalmente a los relays de nivel L2, ya que en el caso de relays L3, el scheduling se asume distribuido. En cualquier caso, el hecho de que el UE sea consciente de la presencia del RS permite acordar ligeras modificaciones en la estructura y procedimientos de nivel MAC. Se requiere la definición de canales de control y datos específicos para el enlace backhaul y access relay. Los procedimientos de nivel MAC, monitorización del canal y la temporización de los procesos HARQ estarán condicionados por el tipo de scheduling.

En líneas generales, aunque como se ha dicho antes puede utilizarse para ampliar la cobertura o incrementar la capacidad, se asume que el escenario de aplicación óptimo es la extensión de cobertura. Aunque los enlaces  $R\_BS \leftrightarrow RS$  y  $RS \leftrightarrow UE$  pueden ser de calidad comparable al de una comunicación  $R\_BS \leftrightarrow UE$  macro, la cantidad de recursos necesarios para la transmisión en dos saltos es doble, por lo que la ganancia de capacidad asociada al uso del relay, con respecto a colocar una nueva estación base, es menor. Por otra parte, al desplegar un relay en lugar de una estación base, se pierde capacidad de duplexado real. Por último, si se asume el despliegue de los RS dentro de la zona de cobertura de la R\_BS como medio para aumentar la capacidad, las comunicaciones pueden sufrir interferencias adicionales provenientes de estaciones base y de relays, de la propia celda o de celdas adyacentes. Todos estos aspectos, hacen que la ganancia de capacidad real en un despliegue fijo con este tipo de relays sea bastante cuestionable si no se diseñan estrategias de reparto y gestión de recursos de manera eficiente.

**Relay "transparente" (Tipo 2).** Este tipo de relay, tiene un coste mucho menor que el relay tipo 1. Se caracteriza por no tener cell ID propio, por lo que no puede crear nuevas celdas. El relay dispone del mismo identificador de celda que la estación base, lo que permite que el usuario conmute la comunicación entre nodos relay y estaciones base 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 usuarios, que no serán conscientes de la existencia de los mismos. Si el relay es transparente, necesariamente el scheduling estará centralizado en la estación base. Todos los UE y RS dentro de la zona de cobertura de la R\_BS están sincronizados con la R\_BS y deben obtener la información de control (sincronización, selección adaptativa de MCS, subportadoras y potencia; asignación de recursos en DL y UL) directamente de la estación base, lo que reduce el overhead de señalización. Es posible aplicar técnicas de transmisión cooperativa, en las que se combina las señales transmitidas por el relay y la estación base, para mejorar la eficiencia. En cuanto a la implementación a tenor de las prestaciones, resulta más adecuada la consideración de relays L2 en lugar de L1. 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.

A diferencia de los de tipo 1, los usuarios tienen que ser capaces de demodular la información de control de la estación base (Figura 3).

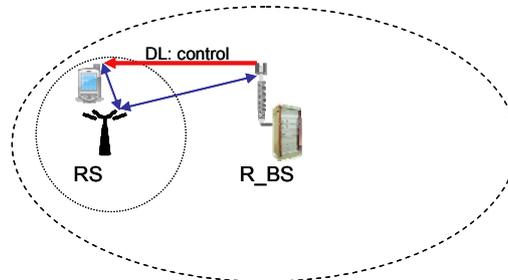


Figura 3 Modo de funcionamiento transparente

## 2.4 Estructura de trama para el modo de funcionamiento no transparente

Como ya se ha comentado, los relays de tipo 1 funcionan desde el punto de vista del UE como estaciones base más o menos complejas, dependiendo de las funcionalidades consideradas en el plano de control y del nivel en el que se produce la retransmisión de los datos, dentro del plano de usuario (el RS puede ser un relay de nivel L2 o L3). Tienen su propio identificador de celda (cell ID) siendo consciente el UE de su presencia, lo que permite acordar ligeras modificaciones en la estructura y procedimientos de nivel MAC, con respecto a la definida para las comunicaciones estándar.

La inclusión de los relays en la infraestructura del sistema tiene implicaciones sobre la estructura de trama y los procedimientos a nivel de enlace.

Centrándonos exclusivamente en el modo de duplexado FDD para el enlace UL y DL en el modo estándar, se asume que el mapeado de los enlaces "backhaul" y "acceso-relay" sobre estas bandas frecuenciales es tal que el RS es visto por el R\_BS como un UE más, y a su vez los UEs que cuelgan del RS ven a éste como a una estación base.

Una cuestión fundamental a tener en cuenta es si el relay puede transmitir y recibir información simultáneamente en la misma banda frecuencial, es decir, si el RS dispone de una doble cadena de Tx (Transmisión) y Rx (Recepción) para cada una de las bandas o no. Aún asumiendo la existencia de dos cadenas de RF (Radio Frequency), hay que tener en cuenta que para evitar la autointerferencia, el RS no debe transmitir y recibir simultáneamente sobre el mismo recurso frecuencial. Las dos opciones genéricas son: utilizar el mismo espectro en diferentes espacios temporales (multiplexado TD: Time Division) para mapear los enlaces backhaul y access relay o compartir los recursos frecuenciales (ancho de banda) en un mismo instante temporal (multiplexado en frecuencia FD - Frequency Division).

En este PFC se considera el multiplexado temporal (TD). En este caso, de acuerdo con propuestas contempladas en LTE se apuesta por la división temporal del MAC en subtramas backhaul y subtramas normales. En las subtramas backhaul, los RS transmiten y reciben información (datos y control) hacia/desde la R\_BS, multiplexándose en cada uno de los enlaces UL y DL (que están duplexados en

frecuencia) En las subtramas normales, los RS transmiten y reciben información (datos y señalización) hacia y desde los UEs que están bajo su dominio en configuración full duplex (duplexado FDD del UL y DL).

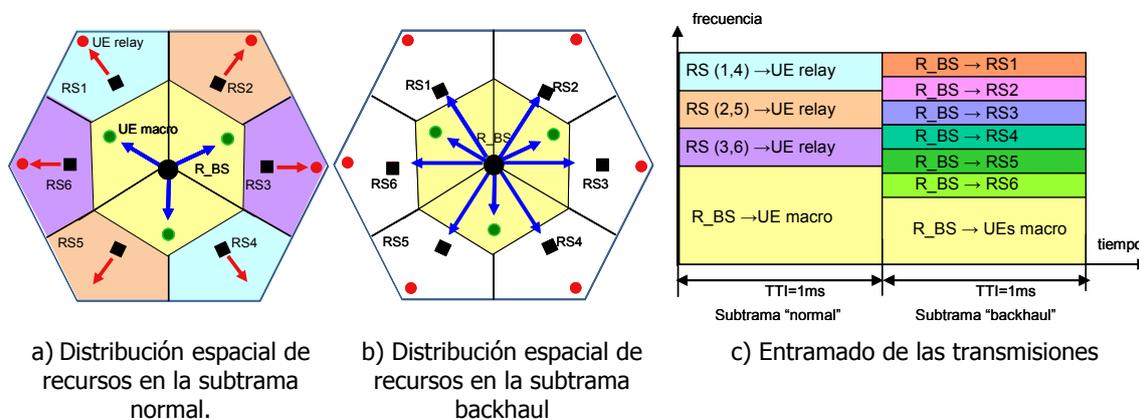
Los requisitos de transporte de señalización y datos para cada uno de esos enlaces son, en líneas generales, similares a los contemplados para el acceso estándar. No obstante, es preciso hacer algunas matizaciones.

En el DL y en concreto en el enlace backhaul se requieren canales de datos para mapear el tráfico recibido de o dirigido a los UEs que cuelgan del RS y señalización de control asociada al soporte HARQ del backhaul ascendente e indicaciones de scheduling para el DL y UL tanto del backhaul como del enlace de acceso al relay (en su caso, dependiendo del modo de scheduling utilizado). Si el scheduling es distribuido, la R\_BS puede limitarse a indicar al RS una zona del espectro donde mapear las transmisiones de sus UEs, de forma que se evite la interferencia con las transmisiones del backhaul (podría reutilizarse el espectro o asignar un bloque de recursos ortogonales), pero será el RS quien decida cómo distribuirlos entre los usuarios conectados al mismo, por lo que estas asignaciones individuales no formarán parte de la señalización requerida.

Los canales de datos del backhaul se pueden multiplexar dentro de la misma subtrama con canales de datos dirigidos a UE macro. No obstante, en lo que se refiere a la señalización se ha convenido la necesidad de definir nuevos canales de control para el backhaul, que se mapean en la zona de datos de las comunicaciones macro.

En cuanto al enlace ascendente, la estructura de trama en ambos enlaces (backhaul y acceso al relay) es análoga a la del modo estándar, salvo que el mapeado de los recursos de control y datos se efectúa en unas subbandas preasignadas sobre los recursos globales del UL. En el UL, la señalización de nivel L1/L2 incluye ACK/NACKs del enlace descendente, CQIs relativos al estado del canal, tanto entre R\_BS y RS como entre RS y UE, peticiones de scheduling (para la transmisión en el backhaul o, en su caso, para el enlace access relay).

La figura 4 muestra un ejemplo de distribución espacial de los recursos frecuenciales utilizados. Como puede observarse, se apuesta por la aplicación de un esquema de multiplexación FDM para las transmisiones relacionadas con los distintos relays que coexisten en el sistema.



**Figura 4** Multiplexación comunicaciones backhaul, access.

En este contexto, desde el punto de vista de coordinación de recursos entre nodos, el aspecto relevante es cómo se reparten los recursos frecuenciales entre los distintos enlaces con el propósito de obtener el máximo aprovechamiento de RBs y por lo tanto la mayor eficiencia, pero teniendo en cuenta que hay que mantener la interferencia limitada.

A priori, la cantidad de recursos 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 dos recursos frecuenciales diferentes) para evitar la interferencia. No obstante, es posible contemplar algunas estrategias de mejora en el uso de los recursos.

En un escenario con dos saltos, puede ser frecuente que los usuarios que reciben servicio de un relay, reciban comparativamente menos señal que de la R\_BS. Este aspecto puede utilizarse para permitir que el RS y la R\_BS transmitan simultáneamente señales reutilizando los mismos recursos frecuenciales siempre que los UEs a los que van dirigidas dichas señales sean diferentes y el nivel de SINR recibido por los mismos sea adecuado. El objetivo ha de ser incrementar la eficiencia del sistema al aumentar el reuso frecuencial, pero sin generar demasiada interferencia. En realidad, el esquema es factible sólo si se cumple que para el UE que recibe la transmisión de la R\_BS, el nivel de señal interferente que recibe del RS está por debajo de la señal útil y viceversa. Para reducir el nivel de interferencia en el UE relay será preciso controlar y seleccionar convenientemente el nivel de señal con el que la R\_BS transmite hacia el UE macro. Por otra parte, dado que el UE macro se ve afectado también por el relay, conviene elegir relays con antenas más o menos directivas y, por otra parte, aplicar la reutilización de canales sobre los UE macro más alejados al relay.

Queda claro, que las soluciones para evitar la interferencia pasan por:

- La partición, estática o dinámica, 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.

- Utilizar información dinámica de los niveles de interferencia soportados en los distintos recursos frecuenciales si es factible aplicar estrategias de reuso frecuencial entre las transmisiones de la R\_BS y el RS

El soporte de varios RS dentro de una misma celda o sector obliga a especificar el esquema de multiplexación (TDM-Time Division Multiplex, FDM-Frequency Division Multiplex o híbrida) de las transmisiones dirigidas a cada uno de ellos en el "backhaul", y evaluar su efecto sobre las prestaciones de los servicios. Además, se precisa un esquema de coordinación de los recursos preasignados a cada uno de ellos para gestionar las transmisiones con sus respectivos UEs. No obstante, en lo que se refiere a la planificación del enlace access relay, es razonable pensar que el emplazamiento y el ajuste de los parámetros físicos de los relays es tal que están planificados de forma que es posible la aplicación de esquemas de reuso frecuencial.

La figura 5 muestra un esquema de partición y reuso frecuencial factible para el mismo escenario. 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 estos 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. Si se asume que estadísticamente las necesidades de transporte de datos asociadas a los UEs que cuelgan de un T\_RS se mantienen bastante estables, se puede optar por efectuar una

reserva semi-estática de recursos para el backhaul y enlace de acceso al relay, permitiendo sólo variaciones a medio plazo de la cantidad de recursos asignados. La reserva de recursos y configuración se notifica mediante señalización de nivel superior (RRC). No obstante, esta opción no tiene porqué excluir la posibilidad de señalar dinámicamente sobre esas mismas particiones ampliaciones puntuales de recursos, particularmente en el backhaul. La R\_BS puede variar dinámicamente la cantidad de recursos físicos (RBs), y el o los esquemas de MCS a utilizar en base a la carga de tráfico, la calidad del enlace backhaul, el tipo de tráfico, parámetros de QoS, etc.

#### 2.4.1 Recursos “extra” necesarios en el modo relay.

Queda claro que en el contexto de comunicaciones a través de los nodos relay, a priori, la utilización de un enlace más supone el uso de recursos “extra” respecto al modo estándar. A efectos prácticos podríamos hablar de un overhead producido por la necesidad de reservar recursos para la transmisión en el backhaul.

No obstante, dicho overhead será mayor o menor (e incluso nulo) dependiendo del nivel de reuso frecuencial que sea posible alcanzar dentro de la celda para el mapeo de los enlaces macro, backhaul y access relay, y de la calidad de dichos enlaces.

Se asume la utilización de técnicas de adaptación de modulación y codificación “AMC” en cada uno de los enlaces por separado, lo que implica que la eficiencia espectral puede ser diferente entre los dos enlaces.

Centrándonos en la tasa de transmisión conseguida por un UE, ésta estará limitada a la proporcionada por el enlace con menores prestaciones, esto es, el mínimo entre la capacidad proporcionada por el enlace backhaul y el enlace de acceso al relay. En este contexto, asumiendo que en cada enlace se reserva un único bloque de recursos frecuenciales para los UEs, interesa que ambos enlaces ofrezcan prestaciones similares. En cualquier caso, el consumo de recursos global es de dos bloques de recursos.

Considerando de forma global el consumo de recursos asociado a las comunicaciones en modo relay, éste se ve reducido al aplicar estrategias de reuso frecuencial. De cualquier forma, si el backhaul dispone de mejores condiciones de canal y se admite la codificación y multiplexación conjunta de las transmisiones asociadas a varios UEs sobre un bloque de recursos dado, el overhead asociado al enlace backhaul podría reducirse.

La cantidad de recursos necesarios para establecer la comunicación es muy importante a la hora de tomar la decisión sobre a qué entidad se deben enganchar los móviles, ya que no sirve de nada mejorar un poco la eficiencia espectral en el enlace access relay si el número de recursos necesarios para dicha comunicación es mucho mayor que si se tramitara de modo estándar. De este modo, es importante establecer criterios de selección de entidad, path selection rule (PSR). Aunque se han contemplado métodos basados en Received Signal Strength indicator “RSSI”, y en Signal Interference plus Noise Ratio, para seleccionar la entidad de la que los móviles deben recibir servicio, este aspecto específico no ha sido objeto de optimización en este proyecto. Una selección más óptima consideraría de forma explícita el consumo de recursos global del UE.

En cualquier caso, para limitar el efecto del backhaul, y partiendo de la base de que los relays son elementos fijos, se ha considerado que su emplazamiento se puede pre-planificar de tal forma que el enlace backhaul posee buenas condiciones de canal. Esto no supone que las localizaciones tengan que planificarse únicamente en condiciones de canal con visión directa, Line Of Sight (LOS) entre R\_BS y RS, también puede

realizarse en condiciones de visión no directa entre ambas. Por otra parte, en el enlace backhaul los relays cuentan con una antena directiva apuntando directamente a la estación base, reduciéndose así el nivel de interferencia captado por el relay en recepción proveniente de las transmisiones de otros relays y estaciones base, lo que a la postre supone una mejora en los niveles de SINR:

Uno de los objetivos del PFC a la hora de abordar el diseño de las estrategias de partición y reúso, ha sido asegurar el buen funcionamiento del enlace backhaul, de tal manera que la obtención de buenas condiciones en el enlace de acceso al relay en ningún caso se vea limitado por el backhaul.

## 2.5 Escenario y objetivos específicos del PFC

Como se ha visto, el soporte de varios RS dentro de una misma celda o sector obliga a especificar el esquema de multiplexación (TDM-Time Division Multiplex, FDM-Frequency Division Multiplex o híbrida) de las transmisiones dirigidas a cada uno de ellos en el "backhaul", y evaluar su efecto sobre las prestaciones de los servicios.

En este contexto, el objetivo del proyecto es estudiar, proponer y evaluar distintos algoritmos de coordinación de recursos para el enlace DL en despliegues con relays bajo la cobertura de celdas tri-sectorizadas, efectuándose un análisis comparativo de la capacidad alcanzada con las configuraciones relay (descontado ya el overhead asociado a las transmisiones sobre el enlace backhaul), frente a escenarios convencionales macrocelulares. El estudio se centra en despliegues con relays no transparentes (relays tipo 1, según la nomenclatura LTE) con duplexado temporal de los enlaces backhaul y acceso al relay.

El objetivo es maximizar el reúso frecuencial para minimizar la reducción de capacidad que supone el overhead asociado al uso de dos enlaces en el modo relay en sustitución de un enlace de menor calidad (acceso estándar).

En los estudios efectuados se han considerado varios criterios de enganche: basados en RSSI, SINR. Los estudios incluyen, a efectos comparativos, la evaluación de alternativas propuestas en la literatura (donde los estudios son todavía escasos y bastante recientes) y de propuestas propias, cuyos detalles se aborda en el siguiente capítulo.

Para la evaluación de los distintos esquemas se ha ampliado una plataforma de simulación de sistema ya existente, incorporando el soporte de transmisiones a través de nodos relay.

# Capítulo 3: Análisis Propuesta y Evaluación de las Estrategias de RRM

En este capítulo se detallan los esquemas de gestión de recursos considerados y propuestos en este PFC, conjuntamente con los resultados de evaluación y estudios comparativos de la capacidad alcanzada.

Como se ha adelantado en capítulos anteriores, los estudios se centran en el ámbito de desarrollo del estándar LTE y LTE-A (LTE Advance), contemplándose así la estructura del acceso radio y parámetros de configuración de nivel físico y enlace asociados a este sistema. En definitiva, en la evaluación de las distintas propuesta se consideran de forma explícita las restricciones impuestas por el nivel físico y el MAC, suposiciones realistas con respecto a la capacidad de estimación del canal y de los niveles de interferencia, la granularidad en la asignación de subportadoras y en el conjunto específico de esquemas de modulación y codificación (MCS) a utilizar.

El trabajo se centra en el contexto de despliegue de redes heterogéneas basadas de forma específica en el despliegue de relays tipo 1, que albergan la funcionalidad HARQ (lo que implica que el HARQ se aplica a cada salto) y la funcionalidad de scheduling (scheduling distribuido), bajo la cobertura de estaciones macrocelulares.

A lo largo del capítulo se presentan y desarrollan varios esquemas de partición y reúso frecuencial para despliegues de 3, 6 y 9 relays bajo la cobertura de celdas tri-sectorizadas. Los esquemas abarcan propuestas basadas en la multiplexación exclusivamente frecuencial de recursos para el soporte de los distintos RS (propuestas extraídas de la literatura) en las subtramas normales y backhaul, para enlace de acceso y backhaul, respectivamente y propuestas híbridas basadas en la multiplexación frecuencial y temporal de los recursos reservados para estos RSs en las distintas subtramas (propuestas propias). En este último caso, desde el punto de vista del sistema, se propuce un reparto o distribución de las transmisiones backhaul dirigidas a los distintos relays en todas las subtramas. El objetivo último es el análisis de la capacidad neta alcanzada con estas configuraciones (descontado ya el overhead asociado a las transmisiones sobre el enlace backhaul), frente a escenarios convencionales macrocelulares, en los que se aplican las estrategias de gestión de interferencia basadas en una variante del ampliamente extendido FFR (Fractional

Frequency Reuse [12]). En concreto, se ha propuesto un esquema de multiplexación híbrido que mejora de forma sensible las prestaciones tanto de los despliegues macrocelulares como de las propuestas identificadas en la literatura para el despliegue de relays.

Por otra parte, siendo la gestión de la interferencia (que implica el diseño de estrategias de compartición y reparto de recursos, ajuste de parámetros de funcionamiento, estrategias de asociación óptima a nodos de acceso) el aspecto más relevante a resolver, su eficiencia no puede desligarse del diseño y comportamiento de las estrategias de gestión a nivel de enlace, por lo que se considera un desarrollo conjunto de estrategias de RRM: scheduling, control de potencia y tasa y gestión de interferencia. Por ello, además de especificar el esquema de reparto y reúso de los recursos preasignados a los nuevos enlaces (backhaul y acceso al relay) para cada RS, se consideran de forma específica los mecanismos de gestión de recursos a nivel de enlace.

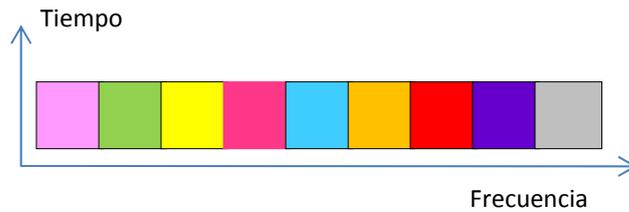
Esto es, los estudios se han efectuado considerando los esquemas de scheduling dinámica temporal y frecuencial, conjuntamente con la aplicación de esquemas selección adaptativa de modulación y codificación (en definitiva de tasa de transmisión), tanto en los enlaces "backhaul" como de "acceso al relay". La utilización de técnicas de adaptación de modulación y codificación (AMC) se ha convertido en una constante en las redes actuales, ya que permite el uso de modulaciones mayores a aquellos usuarios con un buen ratio de señal a interferencia más ruido, lo que se traduce en una eficiencia espectral variable de los recursos en función de las condiciones de cada UE. De este modo la capacidad del sistema también se vería incrementada si todos los usuarios de la celda fueran capaces de utilizar los esquemas MCS más altos.

En los siguientes apartados se detallan las distintas propuestas. Como paso previo se introducen algunos aspectos relativos al modelo de sistema considerado, que facilitará la descripción de las estrategias evaluadas.

### 3.1 Modelo de Sistema

Se considera un sistema multicelular formado por 21 celdas trisectorizadas hexagonales. Los sectores están equipados con antenas direccionales de 120 grados, los relays disponen de antenas direccionales para su comunicación con la R\_BS y por último tanto UEs como RS mantienen antenas omnidireccionales para la transmisión/recepción en el enlace de acceso al relay.

Desde el punto de vista de los recursos a repartir, se considera al igual que en LTE; que la unidad mínima de recursos asignable a un usuario es un Resource Block "RB" que consiste en 12 subportadoras durante 1ms capaces de transmitir 10 símbolos útiles. Para la evaluación de los distintos casos a lo largo de esta memoria se ha considerado un ancho de banda de 5 MHz, lo que resulta en 27 RBs disponibles para el sistema. Con el fin de hacer más visual los distintos esquemas de repartición de recursos, los RBs han sido agrupados en bloques de tres, resultando nueve conjuntos representados cada uno de ellos por un color, tal y como se muestra en la figura 5.

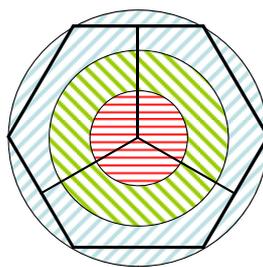


**Figura 5** RBs disponibles en el sistema

Dado que en OFDMA, las subportadoras son ortogonales entre sí, solo se generará interferencia cuando dos o más entidades se encuentren transmitiendo sobre el mismo recurso.

Para el análisis de cada uno de los escenarios explicados posteriormente, se ha utilizado una plataforma de evaluación de redes estándar programada en C++, sobre la que se han incorporado toda la funcionalidad asociada a la comunicación con los nodos relays. Las simulaciones de todos los esquemas analizados o propuestos se han efectuado considerando los modelos de propagación y parámetros de funcionamiento especificados en el 3GPP (por ejemplo, las limitaciones de potencia de estaciones base, relays y terminales móviles), de acuerdo con las especificaciones de este estándar para la evaluación de este tipo de escenarios en el contexto de desarrollo de LTE-A [13], limitaciones de potencia de estaciones base, relays y terminales móviles, de acuerdo con las especificaciones de este estándar. Se ha aplicado la técnica de wrap around para evitar el efecto de bordes en el escenario de 21 celdas considerado. En concreto, todas las simulaciones han sido realizadas atendiendo a las condiciones que son explicadas detalladamente en el Anexo 1.

Para facilitar el análisis del comportamiento de las distintas propuestas, cada una de las celdas ha sido dividida en tres zonas concéntricas que resultan de dividir la celda en anillos de diferente radio a la estación base y con una idéntica área de cobertura. El objetivo es obtener estadísticas independientes del throughput alcanzado de los distintos usuarios dependiendo de su proximidad a la estación base, situada en el centro de la celda hexagonal.



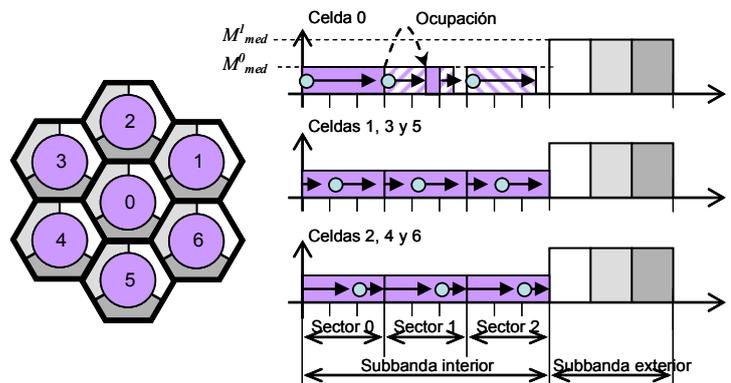
**Figura 6** Estructura de la celda simulada

Los usuarios de cada celda han sido distribuidos de manera uniforme por cada uno de los tres sectores de las celdas y por cada una de las zonas, moviéndose dentro de su sector y zona con una velocidad de desplazamiento de 3Km/h. La ubicación de las estaciones relay dentro de la arquitectura así como el número de ellos desplegados en la celda dependerán de la propuesta concreta a evaluar.

En todos los escenarios analizados, la potencia de transmisión de la estación base va a ser de 43dBm a repartir en toda la banda frecuencial, si bien para los casos de 6 relays configuraciones 1 y 2, 9 de los 27 recursos tendrán un nivel de potencia inferior en 5 dB al resto para limitar la interferencia por los mismos. La potencia del relay, se

establece en 37dBm a repartir uniformemente entre los RBs que se le van a asignar para dar servicio a sus usuarios.

A efectos comparativos, para el escenario macrocelular se considera una variante del algoritmo FFR [12]. El reuso fraccional de frecuencias (FFR) es un esquema de ICIC (InterCarrier Interference Coordination) ampliamente aceptado en redes OFDMA con reuso frecuencial unidad. Haciendo uso del mismo, el ancho de banda del sistema se divide en dos subbandas, una interior y una exterior. En la subbanda interior se aplica reuso unidad, es decir, los bloques de recursos (RBs) de dicha subbanda pueden ser ocupados por usuarios de cualquier sector de la celda. En la subbanda exterior, por el contrario, se aplica sectorización de tal forma que sólo los UEs del sector pueden ocupar los RBs asignados en la subbanda exterior a dicho sector. Además, la potencia de transmisión en la subbanda exterior es más alta que en la subbanda interior (3dB por encima para el caso considerado en este PFC), con el fin de alcanzar a los usuarios situados en el límite de la celda. En cualquier caso la potencia máxima de transmisión de la estación base (43dBm) se distribuye uniformemente en todos los RBs (asumiendo para el cálculo de los umbrales en cada zona el escalón indicado anteriormente). La variante considerada, denominada FFRopa, mejora las prestaciones del reuso fraccional FFR, mediante la propuesta de un scheduling de recursos temporal y frecuencial que limita las fluctuaciones tanto en escenarios de carga completa como parcialmente cargado, al establecer un mecanismo de ordenación en la asignación de RBs, de tal forma que aunque los recursos del interior pueden ser ocupados en cualquier sector de la celda, lo hacen preferentemente en determinados sectores, tal y como se ilustra en la Figura 7.



**Figura 7** Asignación ordenada en la subbanda interior (FFRopa)

En todos los casos, escenarios con relay y macrocelulares, en la implementación de la función de scheduling de la R\_BS y RS, que se ejecuta cada subtrama (TTI: Transmission Time Interval =1ms) se limitan las asignaciones dirigidas a un terminal a un solo RB, contemplándose la selección adaptativa de MCS de acuerdo con las condiciones de canal. La tabla 1 recoge el conjunto de MCSs considerados y los niveles de SINR requeridos para satisfacer una tasa de error en el bloque menor al 1% (requisito de calidad de servicio establecido).

MCS	Configuración	SINR umbral (dB)	Tasa de datos (bits/RB)
0	QPSK $\frac{1}{2}$	10,2	120
1	16QAM $\frac{1}{2}$	17,5	240
2	16QAM $\frac{3}{4}$	21,4	360
3	64QAM $\frac{2}{3}$	27,4	480

**Tabla 1** SINR umbral y tasa de datos para cada MCS

En cualquier caso, la función de scheduling que prioriza las asignaciones dirigidas a los usuarios de acuerdo con una disciplina PF (Proportional Fair) [14]. El scheduler asigna el RB k-ésimo al usuario (UE) j que maximiza el throughput (la tasa), pero en lugar de usar la tasa de transmisión instantánea, se escoge el UE que maximiza el parámetro PF, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\hat{j} = \arg \max_j \left\{ \frac{r_{j,k}[n]}{T_j[n]} \right\} \quad \text{con} \quad PF_{j,k} = \frac{r_{j,k}[n]}{T_j[n]}$$

donde  $r_{j,k}[n]$  es el throughput instantáneo del UE j en el RB k y  $T_j[n]$  el throughput promedio del UEj-ésimo en un tiempo  $t_f$ , calculado de acuerdo con la expresión:

$$T_j[n] = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_f}\right) T_j[n-1] + \left(\frac{1}{t_f}\right) \hat{r}_j[n] & \text{si el UE j recibe servicio en el instante n} \\ \left(1 - \frac{1}{t_f}\right) T_j[n-1] & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Con este planteamiento se reduce la probabilidad de que un usuario con malas condiciones de canal no reciba servicio.

### 3.2 ALGORITMOS EXISTENTES.

El interés en el avance de soluciones basadas en despliegues heterogéneos basados en el uso de una única tecnología de base es reciente y creciente en el ámbito de desarrollo de los sistemas de banda ancha celular basados en OFDMA. De forma global, es preciso destacar la intensa actividad que se está llevando a cabo, particularmente durante estos dos últimos años (2010-2011), en los grupos de trabajo del 3GPP y específicamente en el RAN (Radio Access Network), asociada al desarrollo del modo relay y en general a la optimización de despliegues heterogéneos, abordando los ajustes a nivel MAC, y efectuando análisis preliminares de capacidad. Al analizar los trabajos publicados, las propuestas en el ámbito relay se centran mayoritariamente en los esquemas de transmisión cooperativa propias de los relays transparentes (tipo 2 en LTE-A), existiendo un número todavía bastante limitado aunque creciente de trabajos vinculados con la planificación y asignación de recursos en despliegues basados en relays no transparentes (ej: tipo 1 en LTE-A). Las propuestas técnicas se concentran fundamentalmente en la gestión de interferencia, evaluando en condiciones estables de distribución de carga y de forma agregada, las posibles ganancias de throughput, aunque los resultados de evaluación se ven limitados por la aplicación de esquemas muy simplistas de modelado de tráfico y de gestión de recursos a nivel de enlace.

La mayor parte de las propuestas se centran en escenarios de celdas hexagonales con la estación base en el centro de las mismas y con seis relays en cada celda, situados en la línea que resulta de conectar la R\_BS con cada uno de los vértices de la celda hexagonal (esto es, todos ellos distribuidos en ángulos de 60 grados) y a una distancia de dos tercios del Radio de la celda. En este contexto, los algoritmos de repartición de recursos más representativos identificados en la literatura, que se toman como referencia en este proyecto son tres [15, 16, 17]: 7-part partitioning (PF7), 4-part partitioning (PF4) y 3-part partitioning (PF3).

En todos los casos, las propuestas consideran relays equipados con una única cadena receptora lo que implica la aplicación de un multiplexado TD entre el enlace backhaul y de acceso al relay. Los tres algoritmos utilizan la misma estructura de trama para

multiplexar las comunicaciones entre el enlace backhaul y el enlace de acceso al relay. Esto es, las subtramas se pueden configurar desde el punto de vista de la R\_BS como *Subtramas Estándar* (posibilitan la comunicación en modo estándar entre la BS y los UEs bajo su dominio) o *Subtramas Backhaul* (conjuntamente con las transmisiones macro, permiten la comunicación entre la BS y los RSs bajo su dominio), mientras que desde el punto de vista de los RS, las subtramas son Backhaul (posibilita la comunicación con el R\_BS) o *Subtramas Access* (permiten la comunicación entre los con los UEs), asociándose estas últimas necesariamente con subtramas estándar. No obstante, los estudios consideran de forma simplificada la alternancia de subtramas backhaul (impares) con subtramas "normales" (pares) (esta nomenclatura hace referencia a la coexistencia simultánea dentro de la celda de comunicaciones macro y en el enlace de acceso al relay). En definitiva, responden al modelo ilustrado en el Figura 4.

De este modo en un instante temporal transmitirán todos los relays, mientras que en el siguiente estarán todos los relays en modo recepción. Este tipo de estructura no genera interferencias del tipo  $RS \leftrightarrow RS$ , luego el enlace backhaul tendrá las mismas condiciones radioeléctricas que si se encontrara en una red estándar. Sin embargo la transmisión por parte de todos los relays simultáneamente puede provocar un incremento elevado en la interferencia recibida por los UEs en las subtramas (TTIs) pares. Además puede inducir variaciones bruscas en el canal, teniendo como consecuencia una mala estimación del mismo.

Los estudios se centran exclusivamente en el reparto de recursos y aplicación de estrategias de reuso en las subtramas normales, dejando de lado cualquier consideración sobre el overhead asociado al enlace backhaul. En este sentido, este PFC pretende hacer un análisis más ajustado de la ganancia de capacidad asociado a estos despliegues considerando de forma explícita la subtrama backhaul.

De forma genérica, partiendo de este esquema de multiplexación exclusivamente frecuencial de las transmisiones de los RS y la estación macro, y no existiendo ninguna propuesta específica para la subtrama backhaul, en este proyecto se consideran dos estrategias diferentes la opción 1 y 2 como se puede observar en las figuras 8 y 9.

A la hora de obtener la tasa efectiva de transmisión en la celda, las subtramas backhaul deben ser contabilizadas. Desde el punto de vista de las transmisiones macro, se produce un decremento de la capacidad disponible, mientras que desde el punto de vista de las transmisiones hacia los UEs conectados al relay no se produce una ganancia adicional de throughput, ya que únicamente se produce el reenvío de la información generada en subtramas anteriores. Por ello, la necesidad de reservar recursos para el mapeo del enlace backhaul es vista como overhead. En cualquier caso, la capacidad reservada para el mapeo de los canales backhaul ha de ser igual o mayor que el enlace de acceso al relay al que abastece, de otra forma se establecería un cuello de botella, limitando la capacidad de las nuevas estaciones. Por otra parte, en la medida en que se reutilizan los recursos asignados para la transmisión de subtramas backhaul dentro de la celda, el número de conexiones macro (estándar) soportadas por la estación base se incrementará, lo que a la postre supone una reducción en el overhead asociado al enlace backhaul. No obstante, un mayor nivel de reuso puede implicar un incremento en la interferencia intracelular.

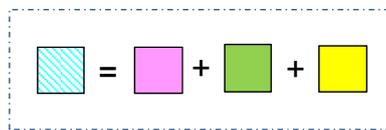
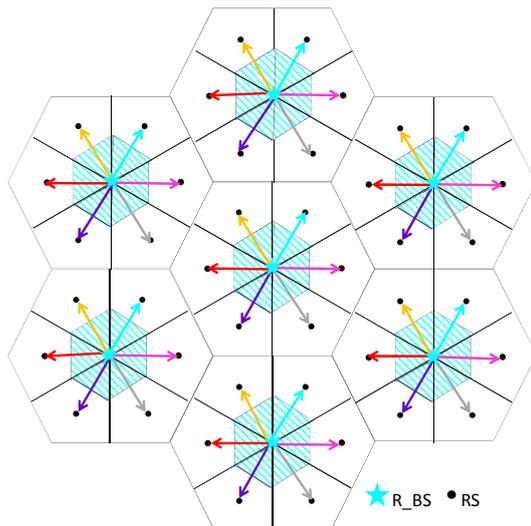


Figura 8 Subtrama backhaul Opción 1.

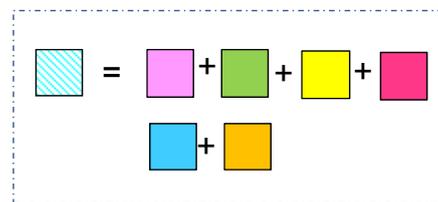
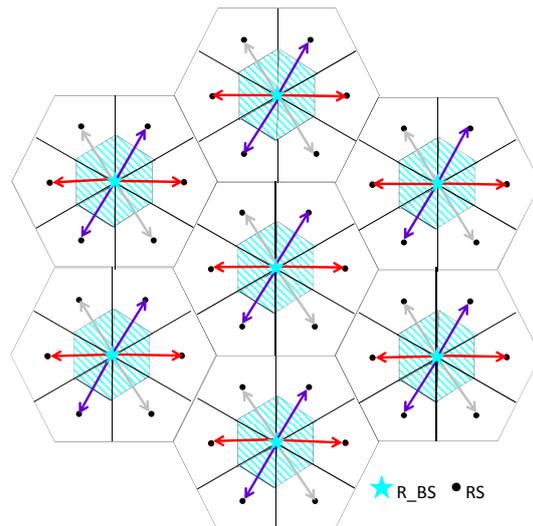


Figura 9 Subtrama backhaul Opción 2.

En la opción 1 cada uno de los enlaces necesita un conjunto de RBs diferentes, por lo tanto no existe interferencia intracelular y el ratio de SINR será más elevado que en la opción 2 donde se reutilizan los recursos originando interferencia intracelular.

En concreto, considerando el ancho de banda (27 RBs) la agrupación de recursos especificado en el apartado anterior (9 bloques de 3 RBs) y que para cada relay se reserva un bloque de recursos (3RBs), el número de recursos disponibles en la estación base, en relación al despliegue convencional de un único salto, es tres veces inferior en la opción 1 (9 RBs) y 2/3 en la opción 2 (18RBs).

A continuación, se explican cada uno de los esquemas propuestos para la subtrama normal.

### 3.2.1 Algoritmo PF7 (Partition Factor 7):

Este esquema consiste en dividir todos los recursos disponibles en 7 grupos, cada uno de los cuales será otorgado a una de las entidades de la celda (1xR\_BS, 6xRS). Los grupos no tienen que contener el mismo número de RBs, estos vendrán fijados por la distribución de los usuarios en la celda, de tal forma que si, por ejemplo, el número de usuarios cercanos a la R\_BS es elevado interesará asignar un grupo con mayor número de RBs a la estación base.

En la figura 10 se puede ver el esquema para las subtramas normales donde se soportan comunicaciones macro y en el enlace de acceso al relay. Se asignan 3 RBs (1 bloque de recursos) para cada entidad RS, mientras que el grupo asignado a la estación base es de 9 RBs (3 bloques de recursos).

Todos los recursos son utilizados en cada celda, pero ninguno de ellos es utilizado en la misma más de una vez, luego el factor de reuso es uno como en el caso de redes estándar. Teniendo en cuenta que se han de reservar en el siguiente TTI un número idéntico de RBs para el enlace backhaul, ya podemos prever que el aumento en la

capacidad efectiva conseguido por la reutilización va a ser nulo, de hecho se va a producir una reducción en el número de conexiones soportadas en el sistema, lo que no es deseable desde el punto de vista del operador. La ventaja que tiene la no reutilización de recursos es que el nivel de interferencia intracelular es cero.

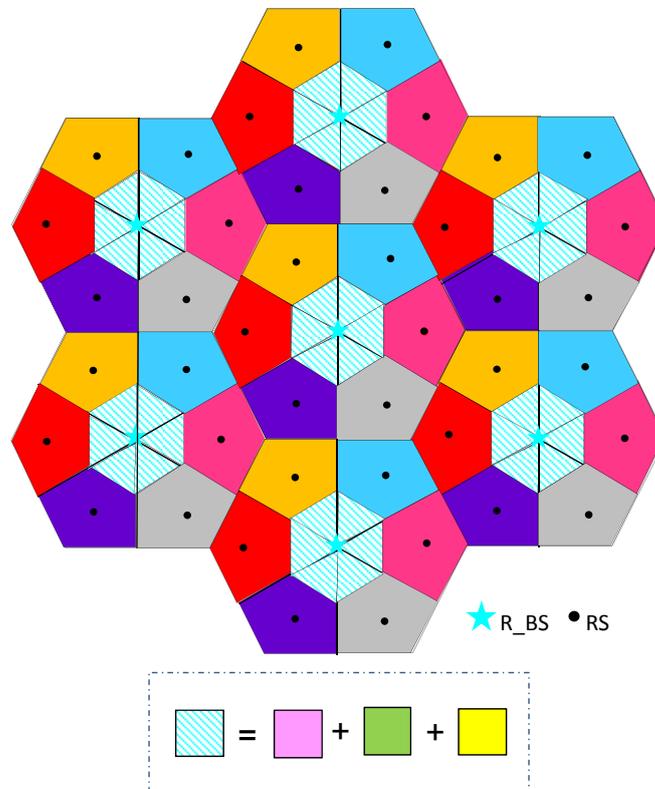


Figura 10 Configuración PF7, Subtrama Normal.

Queda por comprobar si aún, con esta pérdida de conexiones, se ha visto incrementada la capacidad del sistema como consecuencia de una mayor eficiencia espectral conseguida por unidad de RB, pues los usuarios situados en el exterior habrán visto incrementado su ratio de SINR, pudiendo optar a esquemas MCS más elevados.

En la tabla 2 se pueden observar los resultados obtenidos para esta configuración. Como puede apreciarse, se incluyen resultados de tasa efectiva (descontados los paquetes transmitidos con error) para los dos tipos de usuarios (UEs macro y UEs Relay) en cada subtrama (normal y backhaul), separando los resultados en función de la zona en la que se encuentra los móviles. Asimismo, se incluye los porcentajes de utilización de cada MCS y la tasa de error en la transmisión de los bloques (BLER).

Lo primero que se ve es que la segunda de las opciones de implementación del backhaul no es del todo viable en este caso, pues la tasa efectiva conseguida es ligeramente inferior a la necesitada por el enlace de acceso al relay. Esto limita, en sentido estricto la elección a la opción 1, lo que supone una capacidad menor en el sistema respecto a la segunda de las opciones, ya que el número de RBs disponibles para ráfagas estándar se ve muy limitado. No obstante, es cierto que con un planteamiento algo más flexible podría considerarse que en el backhaul gracias a la codificación conjunta del tráfico asociado a todos los UEs podría conseguirse una mayor eficiencia en el transporte, haciendo viable la opción 1.

Los usuarios que han recibido servicio de los relays, lo hacen con el máximo esquema de modulación codificación en un 90% de las ocasiones, motivado por la inexistencia de interferencia intracelular, lo que deriva en ratios de SINR elevados. Como resultado de la aplicación de la disciplina de servicio PF, el acceso al servicio se distribuye de forma bastante equitativa entre los distintos UEs del escenario.

PF7		UEs Macro			UEs Relay	Backaul	
RBs Asignados		9			3x6=18	3x6=18	
UEs enganchados SISTEMA	Total	2198			1582	-	
	z0	1190			70		
	z1	467			792		
	z2	541			720		
		<b>Tr. Normal</b>	<b>Tr.Back. OP1</b>	<b>Tr.Back. OP2</b>	<b>Tr. Normal</b>	<b>Tr.Back. OP1</b>	<b>Tr.Back. OP2</b>
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	1,31	1,296	2,156	0,128	0	0
	16-QAM 1/2	2,64	2,62	3,355	1,019	0	0
	16-QAM 3/4	13,03	12,79	14,564	8,558	0	25,65
	64-QAM 2/3	83,02	83,294	79,926	90,296	100	74,35
BLER (%)	Total	0,257	0,287	0,282	0,218	0	0,457
	z0	0,114	0,134	0,122	0,203	-	-
	z1	0,379	0,42	0,442	0,15		
	z2	0,592	0,652	0,665	0,302		
Tasa efectiva celda Mbps	Total	2,036	2,036	4,01	4,193	4,32	4,024
	z0	1,244	1,256	2,51	0,179	-	-
	z1	0,412	0,405	0,79	2,205		
	z2	0,38	0,375	0,71	1,809		
Tasa total cursada en la celda (Tr. Back OP1)Mbps		2,036+2,036+4,193+4,32=12,585					
Tasa total cursada en la celda (Tr. Back OP2) Mbps		2,036+4,01+4,193+4,024=14,263					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul OP1) Mbps		2,036+2,036+4,193=8,265					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul OP2) Mbps		2,036+4,01+4,193=10.239					

**Tabla 2** PF7 enganche RSSI.

La tasa total cursada en este escenario es de 12,585Mbps, si bien la tasa efectiva neta se ha de calcular sin tener en cuenta el overhead introducido por el enlace backhaul, obteniendo un resultado de 8,265Mbps.

Se ha de tener en cuenta que para llevar a cabo una comunicación a través de los relays serán necesarios 2 ms, por lo que el número de subtramas consideradas para el cálculo de la tasa de transferencia en 1 s será la mitad que que en el caso de que las comunicaciones en modo estándar.

### 3.2.2 Algoritmo PF4 (Partition Factor 4):

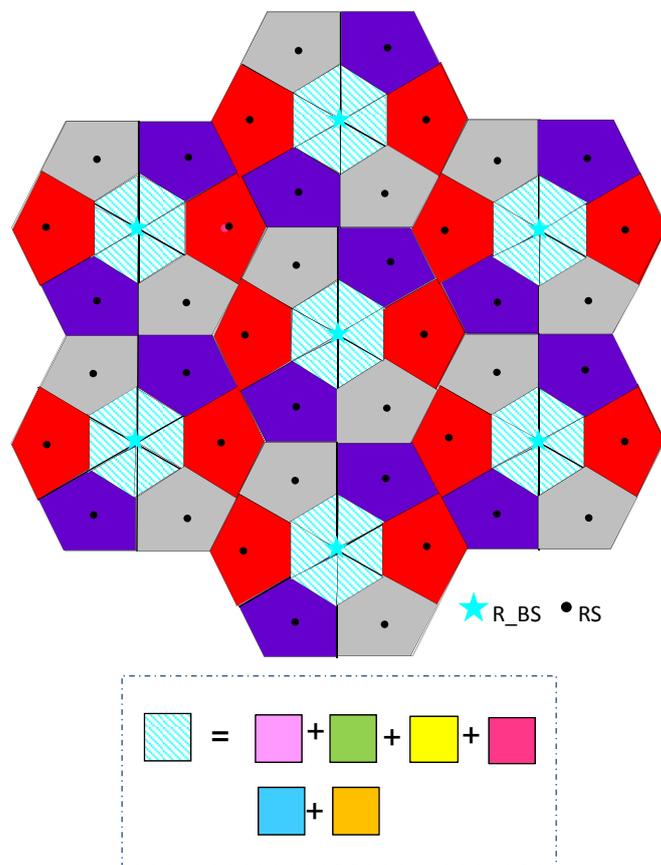
En el esquema PF4 el número de recursos disponibles se divide en 4 grupos. A diferencia del esquema PF7, no se otorga un grupo de RBs distinto a cada una de las entidades de la celda, lo que implica la reutilización de los mismos recursos en la propia celda lo que ocasiona cierto nivel de interferencia intracelular.

Uno de los conjuntos será empleado para las comunicaciones del R\_BS mientras que los tres restantes son repartidos entre los 6 relays, de modo que dos de los relays tendrán asignados el mismo grupo.

Las distintas maneras de repartir los recursos entre los relays, tienen como solución esquemas con características diferentes. El esquema analizado en este PFC consiste en otorgar el mismo grupo de RBs a los relays situados en posiciones opuestas de la misma celda, separando de esta forma las entidades interferentes al máximo, para limitar lo máximo posible el nivel de interferencia.

El hecho de reutilizar de esta manera los recursos nos permite incrementar la capacidad disponible en la R\_BS, respecto al algoritmo PF7 manteniendo el mismo número de RBs para los relays.

En la figura 11 se puede ver como el número de recursos disponibles para la estación base es de 18 y de 3 RBs para cada uno de los Relays.



**Figura 11** Configuración PF4, Subtrama Normal.

En este escenario el factor de reuso frecuencial ya es superior a la unidad, ya que el número de recursos que puede utilizar la celda es 36 en vez de 27. Luego el número de posibles conexiones establecidas en un momento determinado no se ve reducido como si ocurría en el PF7. Tampoco se ha de asociar el hecho de tener 36 recursos con un aumento de capacidad, ya que se ha de tener en cuenta que los recursos otorgados a los relays, solo son aprovechados 1 de cada dos subtramas, luego a efectos prácticos es como si solo tuviéramos la mitad de estos recursos, es decir, 9 lo que suma un total de 27 conexiones al igual que en el caso estándar.

En la tabla 3 se puede observar como, en este caso, tanto la Opción 1 como la 2 se encuentran disponibles, para su uso en la subtrama backhaul. La Opción 2 es la escogida ya que proporciona un mayor número de recursos a la estación base, y por tanto una capacidad efectiva mayor.

PF4		UEs Macro			UEs Relay	Backaul	
RBs Asignados		18			3x6=18	3x6=18	
UEs enganchados SISTEMA	Total	2196			1584	-	
	z0	1187			73		
	z1	467			792		
	z2	542			719		
		Tr.Normal	Tr.Back. OP1	Tr.Back. OP2	Tr.Normal	Tr.Back. OP1	Tr.Back. OP2
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	2,168	1,296	2,156	4,5	0	0
	16-QAM 1/2	3,364	2,62	3,355	6,9	0	0
	16-QAM 3/4	14,698	12,79	14,564	20,5	0	25,65
	64-QAM 2/3	79,767	83,294	79,926	68,1	100	74,35
BLER (%)	Total	0,252	0,287	0,282	0,388	0	0,457
	z0	0,105	0,134	0,122	0,4	-	-
	z1	0,4	0,42	0,442	0,281		
	z2	0,6	0,652	0,665	0,544		
Tasa efectiva celda Mbps	Total	4,01	2,036	4,01	3,787	4,32	4,024
	z0	2,5	1,256	2,51	0,165	-	-
	z1	0,796	0,405	0,79	2,15		
	z2	0,714	0,375	0,71	1,472		
Tasa total cursada en la celda (Tr. Back OP1) Mbps		4,01+2,036+3,787+4,32=14,153					
Tasa total cursada en la celda (Tr. Back OP2) Mbps		4,01+4,01+3,787+4,024=15,831					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul OP1) Mbps		4,01+2,036+3,787=9,833					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul OP2) Mbps		4,01+4,01+3,787=11,807					

Tabla 3 PF4 enganche RSSI.

Comparando las tablas 2 y 3, se puede observar que la tasa total cursada por los relays, es inferior al caso de PF7, teniendo ambas el mismo número de recursos disponibles. Esto es debido a que el nivel de interferencia es más elevado en esta configuración, y por tanto la eficiencia lograda en cada uno de los recursos es menor, como se puede observar, en la utilización de la MCS (64-QAM 2/3) que en este caso solo es utilizada por el 68,1% de los usuarios que reciben servicio, respecto al 90,3% en PF7.

Sin embargo la tasa neta efectiva es mayor que en el caso anterior. Por lo que se puede deducir que existe una relación entre la reutilización de los recursos y la interferencia generada por la misma y en este caso específico, la ganancia proporcionada por el reuso compensa la degradación de la misma debido al incremento de interferencia.

### 3.2.3 Algoritmo PF3:

Siguiendo la misma filosofía que en los dos puntos anteriores, este algoritmo propone la división de los recursos únicamente en tres bandas. Al igual que antes una primera banda será utilizada para las comunicaciones que implican a la estación base mientras que las otras dos bandas serán repartidas entre los relays. En este caso la reutilización de recursos aún es más agresiva que en PF4, PF7, pues solamente hay dos grupos a repartir entre los 6 relays desplegados por las células. Esto deriva en 21 RBs asignables en la R\_BS y 3 en cada RS, resultando un total de 39 RBs, distribuibles para cada una de las celdas. Lógicamente los relays contiguos alternaran el conjunto de RBs a distribuir con el objeto de crear la mínima interferencia posible.

En la figura 12 se pueden apreciar zonas críticas de reutilización de recursos entre celdas vecinas que supondrán un alto nivel de interferencia.

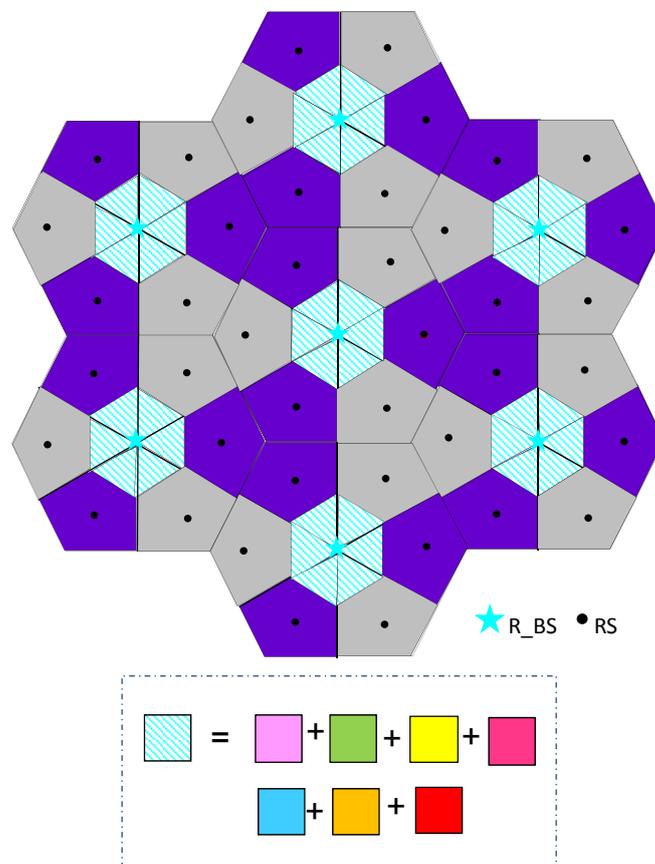


Figura 12 Configuración PF3, Subtrama Normal.

El factor de reuso frecuencial es el más elevado de los tres posibles escenarios, posibilitando un número mayor de conexiones simultáneas. Queda por comprobar, ayudándonos de la tabla 4, si este esquema tan agresivo de reutilización se traduce en una ganancia real de capacidad en la celda.

En primer lugar se observa que tanto la opción 1 como la 2 se encuentran seleccionables para implementar la subtrama backhaul, así pues y siguiendo el mismo criterio que en el PF4, la opción 2 es la escogida por su mayor rendimiento en términos de tasa efectiva.

Centrándonos en el servicio otorgado por los relays a sus usuarios, podemos ver como es en este esquema donde menor es la tasa efectiva transmitida, 3,167Mbps, frente a 3,787Mbps y los 4,193Mbps obtenidos en PF4 y PF7 respectivamente. Esto es debido a que el incremento del nivel de interferencia ha bajado el SINR de los usuarios del modo relay, de manera que solo el 44,274% de ellos ha sido capaz de utilizar la MCS más alta, lo que ha supuesto una bajada drástica frente al porcentaje de usuarios que recibían servicio con la más alta eficiencia espectral en los esquemas anteriores.

Sin embargo, si se observa la tasa efectiva total cursada en la celda, una vez descontado el overhead debido al backhaul, vemos que es 11,832Mbps, similar a la obtenida en el PF4. Esto es debido a que la mayor reutilización de recursos ha incrementado el número de RBs disponibles en la estación base.

PF3		UEs Macro			UEs Relay	Backaul		
RBs Asignados		21			3x6=18	3x6=18		
UEs enganchados SISTEMA	Total	2206			1574	-		
	z0	1192			68			
	z1	474			785			
	z2	540			721			
		Tr.Normal	Tr.Back. OP1	Tr.Back. OP2	Tr.Normal	Tr.Back. OP1	Tr.Back. OP2	
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	2,396	1,296	2,156	17,879	0	0	
	16-QAM 1/2	3,730	2,620	3,355	13,431	0	0	
	16-QAM 3/4	14,970	12,790	14,564	24,416	0	25,650	
	64-QAM 2/3	78,904	83,294	79,926	44,274	100	74,350	
BLER (%)	Total	0,250	0,287	0,282	0,634	0	0,457	
	z0	0,106	0,134	0,122	0,511			
	z1	0,395	0,420	0,442	0,434			
	z2	0,593	0,652	0,665	1,090			
Tasa efectiva celda Mbps	Total	4,655	2,036	4,010	3,167	4,321	4,024	
	z0	2,904	1,256	2,510	0,146			
	z1	0,936	0,405	0,790	2,08			
	z2	0,815	0,375	0,710	0,941			
Tasa total cursada en la celda (Tr. Back OP1) Mbps		4,655+2,036+3,167+4,321=14,178						
Tasa total cursada en la celda (Tr. Back OP2) Mbps		4,655+4,010+3,167+4,024=15,856						
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul OP1) Mbps		4,655+2,036+3,167=9,85						
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul OP2) Mbps		4,655+4,01+3,167=11,832						

**Tabla 4** PF3 enganche RSSI.

De este escenario podemos concluir que si el nivel de interferencia en el sistema no es controlable, una mayor reutilización de recursos no supone un incremento en la tasa efectiva cursada.

De estos tres esquemas propuestos es el PF4, aquel que mantiene un mejor compromiso entre la reutilización de los recursos y la interferencia generada

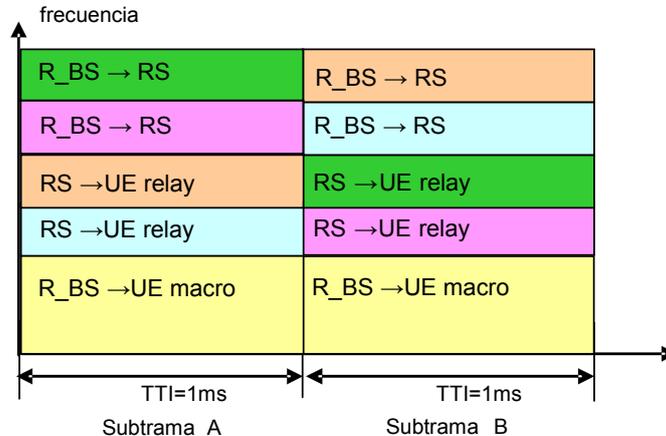
### 3.3 ALGORITMOS PROPUESTOS.

Tras el análisis en profundidad de los algoritmos considerados en la literatura, se pasa a la descripción y análisis de las nuevas estrategias propuestas que son el objeto de este PFC.

En primer lugar se ha de comentar que la estructura de reparto y multiplexación de recursos entre los RSs, dentro de la estructura de trama LTE, se ha modificado respecto a los casos anteriores. Si bien el tipo de ráfagas que deben de existir son similares desde el punto de vista de cada RS, ahora cada uno de ellas se podrá transmitir en cualquier subtrama para un grupo de RS, según convenga. Es decir, si consideramos 6 RS, los recursos reservados para el enlace de acceso al relay de todos ellos, ahora se podrán multiplexar en tiempo y frecuencia.

Con esto lo que se quiere conseguir es que no todos los relays se encuentren transmitiendo a la vez, de tal modo que la posible interferencia generada sobre el móvil sea menor que con la estructura de trama anterior. Lógicamente aparece un nuevo caso de interferencia sobre aquellos relays que se encuentren escuchando, producida por los relays en modo de transmisión. Esta interferencia es asumible ya que no hay que olvidar que la comunicación de los relays con el R\_BS se realiza mediante antenas de tipo directivas, capaces de soportar mayores niveles de interferencia.

Si bien en cualquier TTI es posible la transmisión de cualquier tipo de subtrama, la comunicación por parte de los usuarios en modo relay sigue necesitando de 2 subtramas completas. Es por ello que se deberán de definir al igual que en los PF x ( $x=3, 4, 7$ ), dos tipos de subtramas, en este caso subtrama A y B, haciendo referencia a los TTIs pares e impares respectivamente.



**Figura 13** Multiplexación de comunicaciones en las subtramas A y B.

Para la descripción de los distintos escenarios se ha considerado el mismo ancho de banda y la misma agrupación de recursos, mostrada en la figura 5.

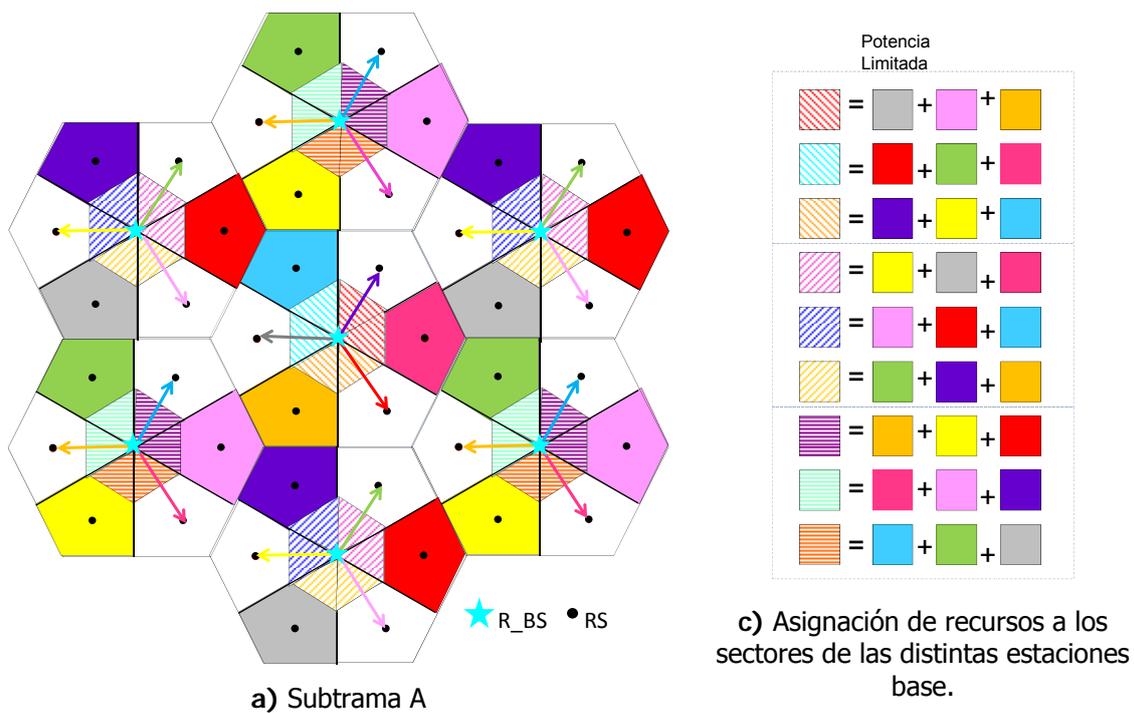
Con el fin de mantener la interferencia más controlada se ha optado por definir un patrón de tres células que ha de ser replicado a lo largo de todo el sistema. Esto no significa que unos determinados recursos vayan a ser utilizados en unas celdas concretas y en otras no, sino que la distribución de los mismos es diferente dependiendo de si se trata de una celda de tipo 0, 1 o 2. Debido a esto el simulador ha de trabajar con 21 celdas en vez de con las habituales 19, ya que el número de celdas totales ha de ser divisible por 3.

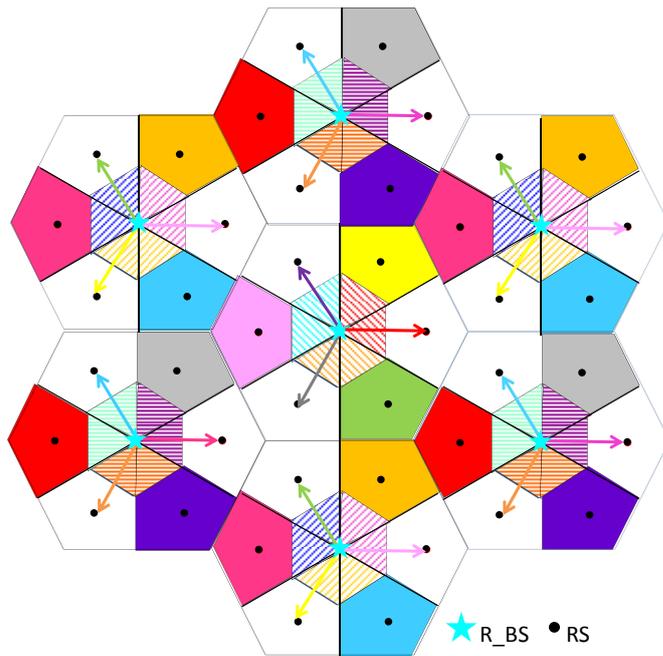
La asignación de RBs en la estación base pasa a restringirse a nivel de sector, traduciéndose de nuevo en un mayor control sobre la interferencia. De este modo para la descripción de cada una de las configuraciones propuestas se deberá especificar el tipo de celda y número de sector al que van dirigidos los recursos.

### 3.3.1 Despliegue de 6 Relays Configuración 1:

Esta configuración tiene como objetivo tratar de obtener el máximo rendimiento de los recursos, teniendo como requisito utilizar los mismos RBs en cada uno de los sectores pertenecientes a la misma clase de celda, tanto en la subtrama A como en la B. Esto ayudara a que los usuarios no vean variaciones bruscas de señal sobre los mismos recursos, que podrían repercutir en una mala estimación del canal.

Las figuras 14 a y b; muestran la descripción de los recursos utilizados para el enlace de acceso de los relays en modo transmisión. Mientras que con flechas se indican los recursos usados para el enlace backhaul (relays en modo recepción). Es en la figura 14c en la que se describe detalladamente los recursos asignados a cada uno de los sectores de la estación base.





b) Subtrama B

Figura 14 Despliegue de 6 relays configuración1.

Hay que destacar que un grupo de recursos asignados en cada uno de los sectores de las celdas, serán transmitidos con 5 dB menos de potencia que el resto, para limitar el nivel de interferencia generado sobre el enlace backhaul, que en otro caso sería demasiado alto, limitando su capacidad. Estos recursos serán previsiblemente asignados por la R\_BS a los usuarios del interior de la celda.

6 relays CONF 1		UEs Macro		UEs Relay		Backaul	
RBs Asignados		27		3x6=18		3x6=18	
UEs enganchados SISTEMA	Total	2326		1454		-	
	z0	1200		60			
	z1	519		740			
	z2	607		654			
		Trama A	Trama B	Trama A	Trama B	Trama A	Trama B
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	18,039	12,26	11,862	2,639	0	0
	16-QAM 1/2	12,789	13,85	11,725	4,549	0	0
	16-QAM 3/4	19,982	24,90	25,621	20,592	0,03	0,030
	64-QAM 2/3	49,189	48,99	50,8	72,22	99,97	99,97
BLER (%)	Total	1,05	0,591	0,608	0,419	0	0
	z0	0,329	0,289	0,489	0,388		-
	z1	2,25	0,822	0,4224	0,326		
	z2	4,78	1,914	0,932	0,553		
Tasa efectiva celda	Total	4,814	5,01	1,693	1,948	2,159	2,159
	z0	3,622	3,50	0,068	0,076		-
	z1	0,758	0,87	1,018	1,094		
	z2	0,434	0,64	0,607	0,780		
Tasa total cursada en la celda		4,814+5,01+1,693+1,948+2,159+2,159=17,783					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul)		4,814+5,01+1,693+1,948=13,465					

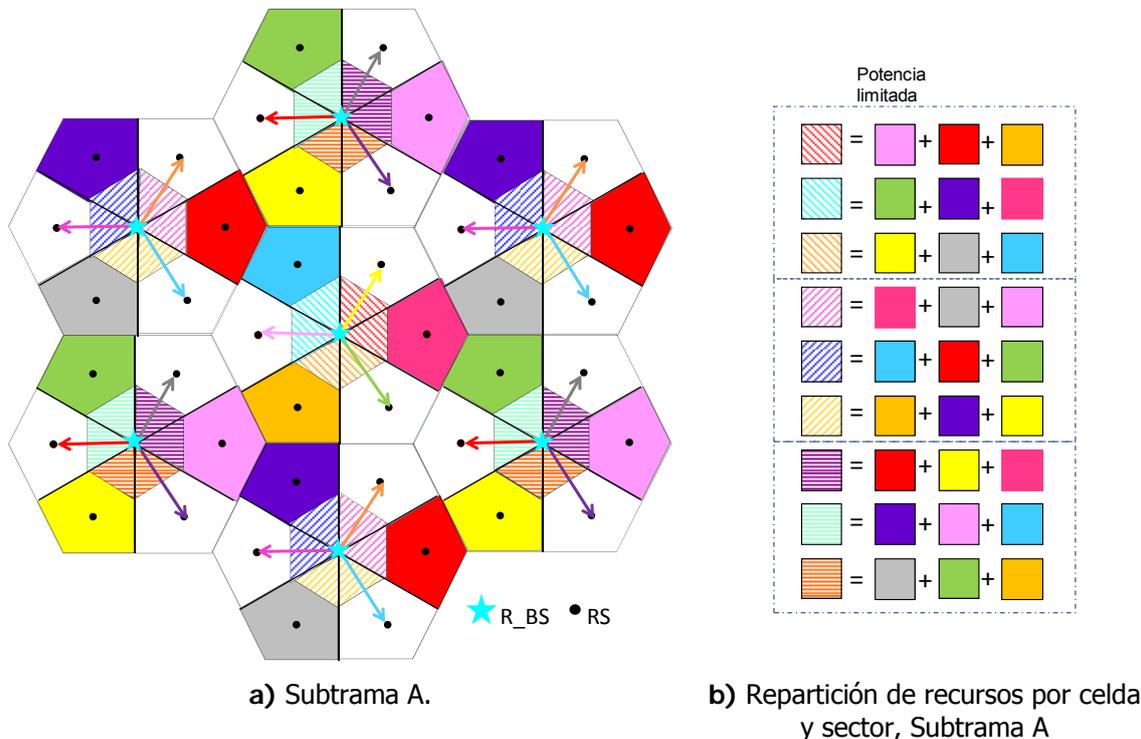
Tabla 5 Despliegue de 6 relays configuración 1, enganche RSSI.

El objetivo a conseguir en la repartición de recursos es claro, reutilizar al máximo los recursos disponibles en la celda maximizando la distancia entre aquellas entidades que transmitan sobre los mismos RBs. Se puede observar como en aquellas zonas con alta probabilidad de conflicto, recursos distintos son asignados para evitar interferencias. Además el número de recursos disponibles en la celda es de  $27+9$  lo que implica un número de conexiones simultáneas mayor al cursado en el caso estándar.

La tasa efectiva cursada en la celda obviando el overhead es de 13,465Mbps, llama la atención el gran incremento experimentado respecto a las estrategias de tipo PFX ( $x=3, 4, 7$ ) analizadas anteriormente. Sin embargo analizando en detalle los resultados, se puede observar como existe un comportamiento notablemente distinto entre las subtramas A y B, esto es debido a que ambas subtramas no son simétricas, es decir, los recursos interferentes no se encuentran a la misma distancia en A que en B. Esto queda reflejado perfectamente en la utilización de la MCS así como en el BLER total. El enlace backhaul no se ve afectado dado que utiliza antenas directivas, con lo cual la interferencia proveniente de otras celdas está bastante limitada.

### 3.3.2 Despliegue de 6 Relays Configuración 2:

Esta configuración surge de la necesidad de igualar el comportamiento de la subtrama A de la configuración 1 con el buen rendimiento conseguido en la subtrama B de la misma. Es por esto que la subtrama B utilizada para esta configuración no difiere en nada a la usada en la primera de las configuraciones. La principal diferencia se encuentra en los recursos asignados a la estación base que ya no se podrán mantener iguales en ambas subtramas. Se puede observar que en este caso los recursos utilizados para el enlace backhaul son otros, los mismos que deberán de ver reducida su potencia de transmisión en la estación base para no comprometer la capacidad de dicho enlace. El cambio ha de ser el menor posible, dos de los tres recursos asignados a cada sector permanecen iguales en ambas subtramas.



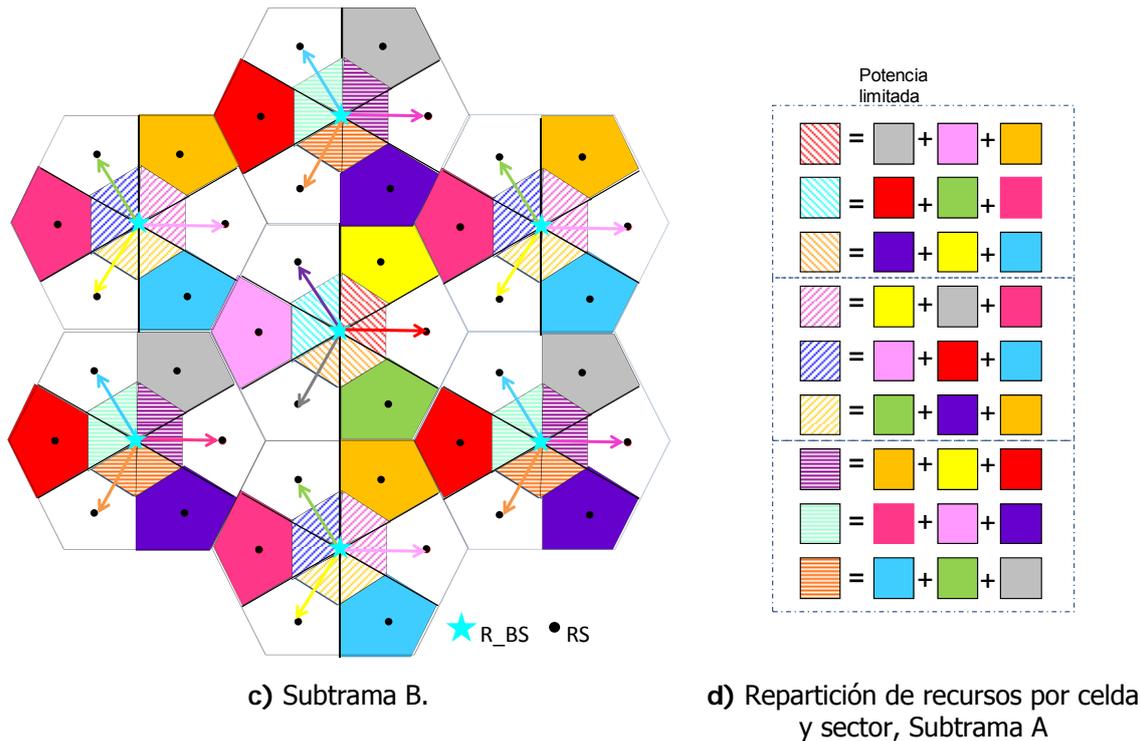


Figura 15 Despliegue de 6 relays configuración 2.

En la Tabla 6, se puede ver el análisis de los resultados obtenidos en la simulación para este escenario. Lo primero que se aprecia es que el comportamiento de las distintas subtramas se ha asemejado bastante, que era el objetivo buscado. Las pequeñas diferencias entre ambas se debe a la distribución de los usuarios sobre el sistema, ya que el número de usuarios en cada una de las zonas puede variar.

6 relays CONF 2, RSSI		UEs Macro		UEs Relay		Backhaul	
RBs Asignados		27		3x6=18		3x6=18	
UEs enganchados SISTEMA	Total	2325		1455		-	
	z0	1205		55			
	z1	516		743			
	z2	604		657			
		Trama A	Trama B	Trama A	Trama B	Trama A	Trama B
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	8,141	8,179	2,516	2,462	0	0
	16-QAM 1/2	12,398	12,488	5,4078	4,546	0	0
	16-QAM 3/4	30,99	31,08	22,296	20,832	0,034	0,037
	64-QAM 2/3	48,469	48,254	69,779	72,159	99,966	99,963
BLER (%)	Total	1,036	1,13	0,367	0,415	0	0
	z0	0,458	0,52	0,381	0,387		
	z1	1,49	1,69	0,27	0,316		
	z2	3,44	3,65	0,49	0,554		
Tasa efectiva celda Mbps	Total	5,127	5,116	1,933	1,95	2,159	2,159
	z0	3,561	3,561	0,076	0,076		
	z1	0,913	0,918	1,079	1,092		
	z2	0,653	0,637	0,778	0,782		
Tasa total cursada en la celda Mbps		5,127+5,116+1,933+1,95+2,159+2,159=18,444					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul)		5,127+5,116+1,933+1,95=14,126					

Tabla 6 Despliegue de 6 relays configuración 2, enganche RSSI.

En este escenario hemos conseguido reutilizar todos los recursos en la estación base, lo que implica que el número de conexiones será de nuevo mayor a las ofrecidas por el caso estándar.

Dados los buenos resultados obtenidos en esta configuración, se optó por evaluar el esquema considerando un esquema de selección de nodo (enganche) basado en el nivel SINR, es decir, el UE se engancha a aquella entidad que en media estima que le proporcionará un mayor nivel de SINR en recepción. La estimación se basa en el nivel de señal promedio medido sobre señales piloto y el nivel de interferencia observado en la banda de recursos asignados al nodo en cuestión (R\_BS o RS).

En la tabla 7 se observa que el número de UEs enganchados a los relays se ha visto incrementado, lo que produce una reducción en el número de usuarios macro. Si observamos la diferencia entre estos resultados y los anteriores comprobamos que la capacidad conseguida por la estación base se ha visto incrementada, mientras que la tasa efectiva de los relays ha sufrido el efecto contrario. Esto se debe a que el grupo de UEs que se ha movido de una entidad a otra no tiene unas condiciones óptimas en ninguna de las dos entidades, como todos los móviles deberían de recibir servicio, la entidad que les proporcione el mismo verá reducida su tasa efectiva.

La tasa efectiva ha sufrido una pequeña mejora, pero esta es insignificante consecuentemente de aquí en adelante seguiremos analizando los distintos escenarios utilizando el algoritmo de selección de entidad RSSI.

6 relays CONF 2, SINR		UEs Macro		UEs Relay		Backaul	
RBs Asignados		27		3x6=18		3x6=18	
UEs enganchados SISTEMA	Total	2028		1752		-	
	z0	1192		68			
	z1	492		830			
	z2	407		854			
		Trama A	Trama B	Trama A	Trama B	Trama A	Trama B
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	6,545	6,375	5,917	4,461	0	0
	16-QAM 1/2	10,835	11,279	8,042	6,971	0	0
	16-QAM 3/4	30,699	30,708	23,756	22,508	0,03	0,035
	64-QAM 2/3	51,922	51,637	62,285	66,059	99,97	99,965
BLER (%)	Total	0,834	0,956	0,403	0,429	0	0
	z0	0,47	0,578	0,347	0,476		
	z1	1,25	1,48	0,288	0,314		
	z2	2,75	2,81	0,55	0,57		
Tasa efectiva celda Mbps	Total	5,269	5,257	1,841	1,883	2,16	2,16
	z0	3,873	3,864	0,069	0,081		
	z1	0,864	0,87	0,984	1,021		
	z2	0,532	0,523	0,788	0,781		
Tasa total cursada en la celda Mbps		5,269+5,257+1,841+1,883+2,16+2,16=18,57					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul) Mbps		5,269+5,257+1,841+1,883=14,25					

**Tabla 7** Despliegue de 6 relays configuración 2, enganche SINR

### 3.3.3 Despliegue de 9Relays configuración 1:

En aquellas ubicaciones donde la densidad de usuarios es muy elevada, puede resultar interesante el despliegue de un número mayor de relays en la celda. En este caso se propone un esquema con 9 relays por célula. Sin embargo el despliegue de tantas entidades dificulta, aún más si cabe, la elaboración de estrategias donde se llegue a un compromiso entre el factor de reuso frecuencial utilizado y el nivel de interferencia generado en el sistema.

Lo primero que se debe definir es la ubicación de cada uno de los 9 relays en la celda, en este caso se ha optado por mantener 6 relays en las mismas posiciones que en los esquemas anteriores, es decir, a una distancia de  $2/3$  del radio de la celda y formando ángulos de 60 grados tomando como referencia a la estación base. Los tres nodos relay restantes se sitúan sobre la frontera ( $d=R$ ) formando ángulos de 30, 150 y 270 grados respecto a la  $R_{BS}$ . La mayor distancia existente entre  $R_{BS}$  y  $R_S$  para estos tres relays, provoca una atenuación mayor sobre el enlace backhaul, obligando al uso de recursos cuyo nivel de reutilización no sea muy elevado, para que la capacidad de dicho enlace no se vea reducida.

Como se puede observar en la figura 16, la ubicación externa de 3 de los relays posibilita el enganche de usuarios de distintas celdas a estos nodos, generando un anillo de relays equivalente a uno de mayor tamaño, que puede servir a todos los usuarios situados en la zona 2.

La estructura de trama utilizada en este caso es similar a la utilizada en las configuraciones 1 y 2 de 6 relays, es decir, se distinguirá entre subtramas A y B.

Se puede observar como en la subtrama A se produce la transmisión por parte de los 6 relays más cercanos, a la vez que se emite el enlace backhaul para los nodos exteriores, mientras que en la subtrama B sucede lo contrario.

El número de recursos asignados a la estación base pasa a ser 18, lo que supone una reducción respecto a las configuraciones 1 y 2 de 6 relays propuestas anteriormente. Esto se debe a la necesidad de reservar 9 recursos para poder implementar el enlace backhaul de los relays que se encuentran en el exterior de la celda, ya que la atenuación sufrida por el enlace es mayor. Sin embargo, en la subtrama B, los recursos usados en los relays del exterior en el enlace de acceso, son reutilizados en el backhaul para relays que se encuentran más cercanos, lo que supone el alcance de un gran nivel de SINR, no necesaria. Por ello, se ha optado por reducir la potencia de estos recursos con objeto de reducir las interferencias generadas sobre el resto de entidades que utilicen los mismos recursos.

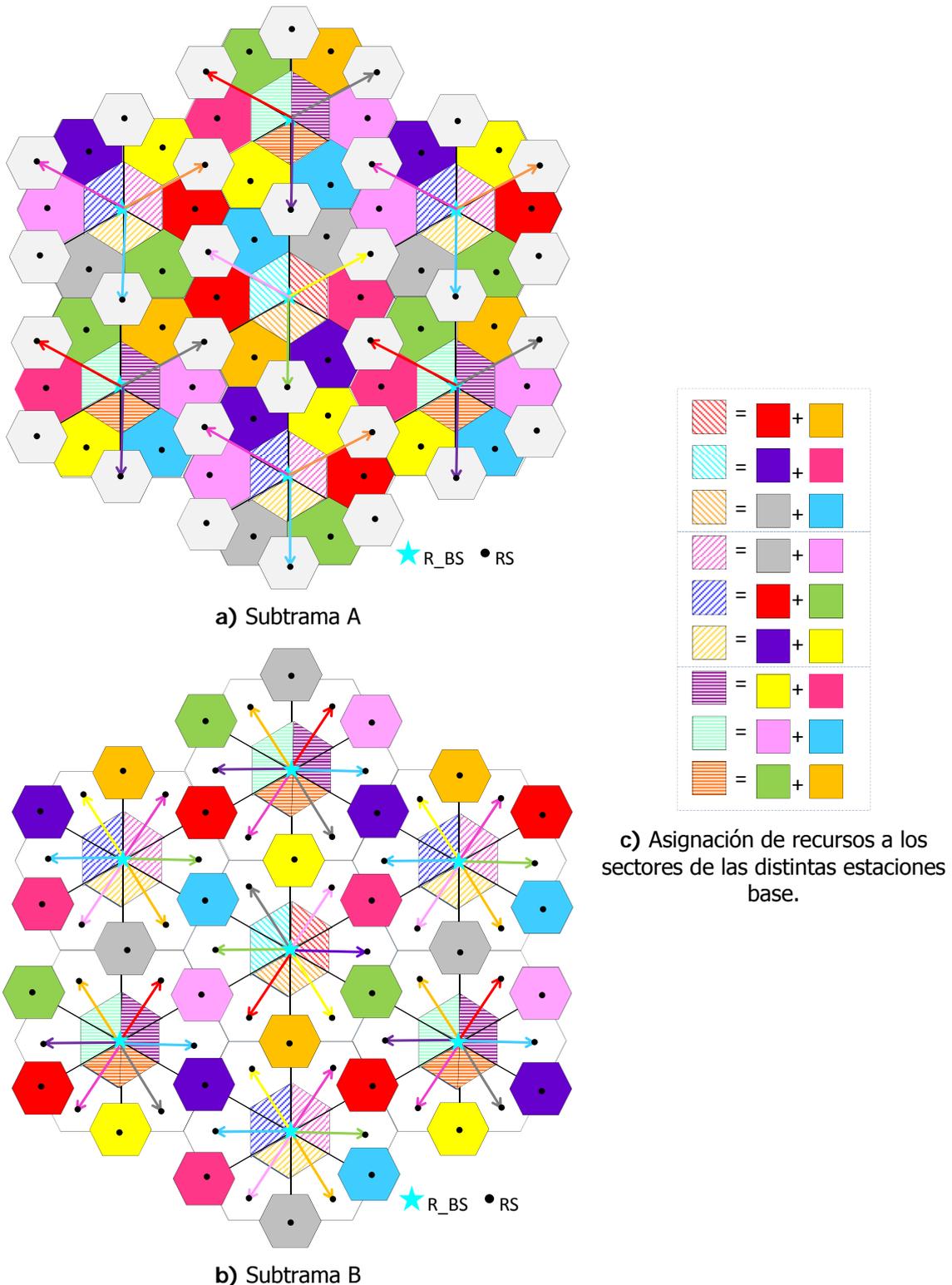


Figura 16 Despliegue de 9 relays configuración 1.

El número de usuarios que reciben servicio a través de los relays es mayor que en los casos anteriores, debido a que la zona cubierta por los mismos es mayor. Sin embargo el cambio de conexiones de modo estándar por conexiones en modo relay no es beneficioso en todos los casos, debido a que el número de saltos para llevar a cabo la comunicación es el doble.

En la tabla 8 se pueden observar los resultados obtenidos:

9 Relays CONF 1		UEs Macro		UEs Relay		Backaul	
RBs Asignados		18		3x9=27		3x9=27	
UEs enganchados SISTEMA	Total	1748		2032		-	
	z0	1187		72			
	z1	364		896			
	z2	197		1064			
		Trama A	Trama B	Trama A	Trama B	Trama A	Trama B
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	0,714	0,776	0,818	2,776	0	0
	16-QAM 1/2	1,64	1,799	2,549	5,13	0	0,002
	16-QAM 3/4	10,097	13,084	15,871	19,041	0	12,68
	64-QAM 2/3	87,55	84,339	80,762	73,053	100	87,317
BLER (%)	Total	0,282	0,385	0,336	0,745	0,058	0,255
	z0	0,127	0,284	0,569	0,207		
	z1	0,456	0,637	0,265	0,82		
	z2	1,123	1,39	0,439	0,728		
Tasa efectiva celda Mbps	Total	4,14	4,099	4,053	1,907	2,158	4,172
	z0	2,926	3,343	0,223	0,006		
	z1	0,859	0,564	2,575	0,394		
	z2	0,355	0,192	1,255	1,507		
Tasa total cursada en la celda Mbps		4,14+4,099+4,053+1,907+2,158+4,172=20,529					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul) Mbps		4,14+4,099+4,053+1,907=14,199					

**Tabla 8** Despliegue de 9 relays configuración 1, enganche RSSI.

La necesidad de un número elevado de recursos para la implementación del backhaul, convierte en una tarea aún más difícil la asignación de RBs en la Subtrama B, ya que se debe garantizar una gran eficiencia espectral en los mismos para el correcto funcionamiento del sistema. Se observa como la capacidad alcanzada en el enlace backhaul supera la necesaria para el reenvío de la información transmitida en el enlace de acceso al relay, luego el sistema no presentara cuellos de botella originados por dicho enlace.

La tasa efectiva conseguida es similar a la obtenida en el caso de 6 relays configuración 2 elevada, debido al menor uso de las comunicaciones en modo estándar y al aumento en el nivel de interferencia. Consecuentemente, la única ventaja de este escenario es un reparto más equitativo del acceso al servicio en toda la cobertura de la celda.

### 3.3.4 Despliegue de 3 Relays configuración 1:

En este caso se va a proceder a la evaluación de un escenario con un menor número de relays. El objetivo es valorar el impacto del número y distribución de los relays sobre la capacidad alcanzada.

Como se puede ver en la figura 17, la estructura de trama utilizada es la misma que en los algoritmos Partition Factor (PF). Así pues tendremos subtramas normales y subtramas Backhaul. Los tres relays se ubican en la frontera entre las distintas celdas ( $d=R$ ), formando un ángulo de 30, 150 y 270 grados con la estación base con la que se comunican. Los UEs situados en la zona más exterior de la celda, serán sus potenciales usuarios, permitiéndose el enganche de estos independientemente de la macrocelda a la que pertenezcan.



Los recursos disponibles en las dos subtramas son los mismos, tal y como muestra la figura 17.

En la tabla 9 podemos observar los resultados obtenidos para esta configuración. La tasa efectiva de servicio en la celda, si bien no es tan elevada a la conseguida por la configuración 2 de 6 relays, es alta. Hay que resaltar que esta propuesta es óptima en el plano económico, ya que el número de relays a desplegar es el menor de todos los escenarios analizados.

3 Relays CONF1		UEs Macro		UEs Relay		Backaul	
RBs Asignados		27		3x3=9		3x3=9	
UEs enganchados SISTEMA	Total	2596		1184		-	
	z0	1255		5			
	z1	896		363			
	z2	445		816			
		Trama A	Trama B	Trama A	Trama B	Trama A	Trama B
Utilización MCS (%)	QPSK 1/2	2,059	2,69	2,04	-	-	0
	16-QAM 1/2	4,374	5,387	4,95	-	-	0
	16-QAM 3/4	19,047	23,511	19,349	-	-	3,106
	64-QAM 2/3	74,519	68,413	73,659	-	-	96,894
BLER (%)	Total	0,423	0,539	0,344	-	-	0,222
	z0	0,147	0,304	0,623	-	-	-
	z1	0,64	0,77	0,406	-	-	-
	z2	1,319	1,43	0,326	-	-	-
Tasa efectiva celda Mbps	Total	5,904	5,762	1,962	-	-	2,138
	z0	3,489	3,657	0,0006	-	-	-
	z1	1,791	1,56	0,458	-	-	-
	z2	0,624	0,545	1,5034	-	-	-
Tasa total cursada en la celda Mbps		5,904+5,762+1,962+2,138=15,766					
Tasa efectiva de servicio en la celda (eliminando el overhead del backhaul) Mbps		5,904+5,762+1,962=13,628					

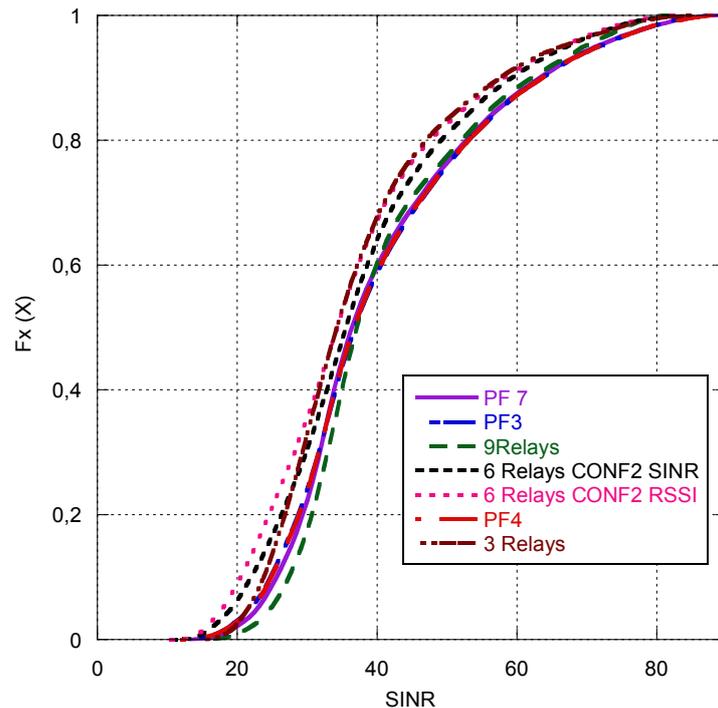
Tabla 9 Despliegue 3 relays configuración 1, enganche RSSI.

### 3.4 Comparativa de los distintos escenarios:

Tras el análisis particular de cada uno de los casos propuestos, a continuación se va a realizar una discusión acerca de los distintos métodos atendiendo a la función de distribución de la SINR presentada por cada uno de ellos.

La figura 18 muestra la función de distribución de probabilidad de la SINR para aquellos usuarios que reciben servicio de la estación base. En ella se puede observar como el comportamiento en los distintos escenarios es bastante bueno pues en todos los casos el 80% de las transmisiones presentan un nivel de SINR mayor o igual 25 dB. Podemos destacar:

- El escenario de 9 Relays ofrece el mejor de los comportamientos. Es observable especialmente en la banda de 0 a 0,4 de su  $F_x(X)$ , esto se debe a que la existencia de relays situados tanto a 2/3 del radio como en la frontera de las celdas, permite que solamente los usuarios muy cercanos a la  $R_{BS}$ , reciban servicio de la misma. De esta manera podemos ver como el 80% de los usuarios tienen un SINR mayor o igual a 30 dB lo que les permite recibir sus datos con la MCS más eficiente.



**Figura 18** Función de distribución para los usuarios enganchados a las R\_BS

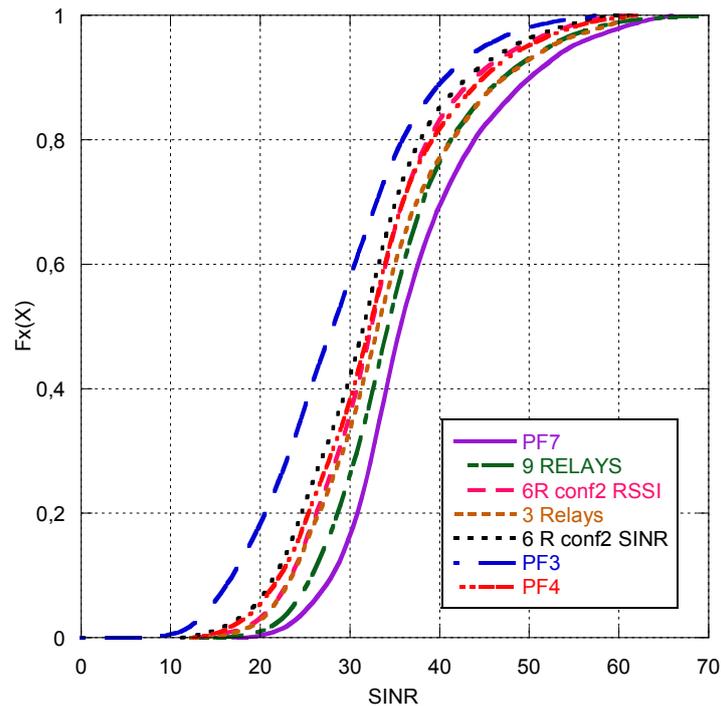
- El escenario de 3 Relays presenta un peor comportamiento, debido a que el número de usuarios enganchados a la R\_BS es más elevado, incluyendo UEs que presentan muy buenas condiciones de canal con otros más alejados cuyas condiciones son peores. Esto es normal ya que los relays se encuentran ubicados en el límite de la celda.

- De los escenarios con 6 relays, el PF7 presenta el mejor comportamiento debido a la inexistencia de interferencia intracelular. Sorprenden los valores obtenidos para la propuesta configuración 2, que se deben a que parte de los recursos de la R\_BS son transmitidos con un nivel potencia 5 dB por debajo del resto, lo que implica que los usuarios que utilicen esos recursos no alcanzarán un nivel de señal útil a interferente tan elevado como los demás.

Ahora se analizarán las funciones de distribución obtenidas cuando la entidad de acceso es un nodo relay. (Figura 19). Los niveles de SINR conseguidos son más bajos ya que el nivel de potencia emitido por las estaciones relay es menor y las diferencias entre unos esquemas y otros son mayores. Sorprende las diferencias notorias en el comportamiento entre los sistemas con 6 relays desplegados.

- El PF3 es el peor de los casos analizados, debido al alto nivel de interferencia al que se ven sometidos los usuarios conectados a los relays, fácilmente apreciable en la Figura 19.

- Como era de esperar, el PF7 tiene los mejores niveles de SINR, ya que la interferencia intracelular en este esquema es nula.



**Figura 19** Función de distribución para los usuarios enganchados a los RS

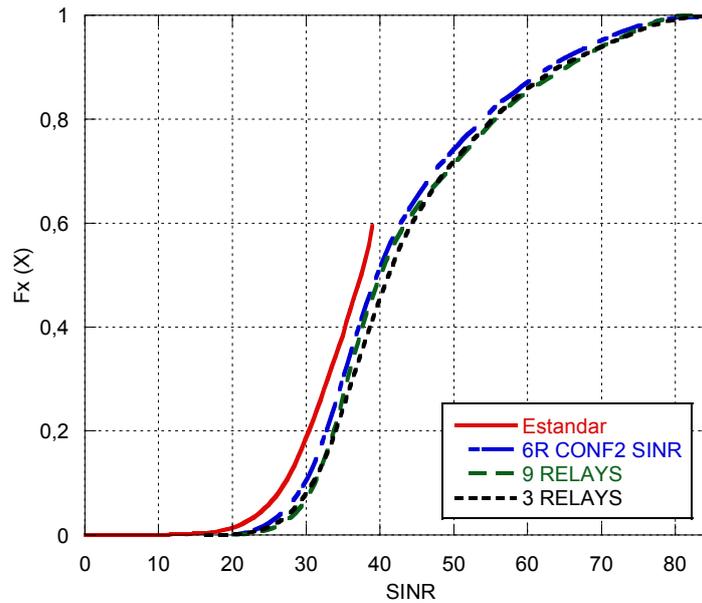
- De nuevo el escenario de 9 relays tiene un muy buen comportamiento. Debido al gran número de relays desplegados, lo que origina que los grupos de usuarios servidos por estas entidades sean más reducidos y tengan muy buenas condiciones de canal.
- Los escenarios de 6 relays propuestos (configuración 2), así como el de 3 relays y el PF4, tienen comportamientos similares difiriendo en unos pocos dB y situándose bastante por encima del escenario PF3.

Una vez analizados y comparados todos los escenarios con despliegue de relays, ahora vamos a comparar solamente los escenarios propuestos en este PFC con el caso de una red estándar que implementa el algoritmo FFRopa. La comparación se realiza por zonas, ya que el caso estándar no dispone de relays.

En la Figura 20 observamos la función de distribución para los usuarios de la zona 0, en la Figura 21 la zona 1, y en la Figura 22 la zona 2.

Si nos fijamos en el comportamiento que la red estándar proporciona a los usuarios de cada una de las zonas, se observa claramente como la distancia de los usuarios influye en la SINR obtenida. Así pues la SINR será máxima para aquellos usuarios ubicados en la zona 0, mientras que en la zona 2 se encuentran los móviles que presentan peores condiciones de canal. Es en este punto donde radica la principal diferencia entre los esquemas con relays y el caso convencional. Como se puede ver en los escenarios con relays la función de distribución no se ve tan perjudicada en ninguna de las zonas.

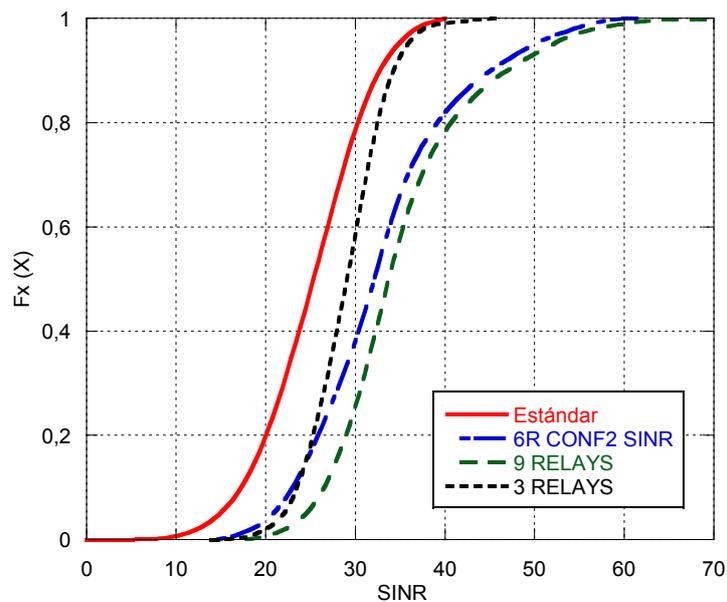
En las tres zonas el nivel SINR recibido por los usuarios de los escenarios multsalto es mayor que en la red estándar, si bien las diferencias son mínimas en el caso de Z0.



**Figura 20** Función de distribución para los usuarios de la zona 0.

Destaca el buen comportamiento del despliegue de 9 relays, en las zonas 1 y 2, asociado al mayor número de entidades disponibles para el enganche, lo que supone más oportunidades, por parte de los usuarios, para obtener buenas condiciones de canal en cualquier área de la celda. Consecuentemente el acceso al servicio es más homogéneo en toda la celda.

En cuanto al comportamiento de los escenarios de 3 y 6 relays, es el esperado siendo el de 6 relays mejor para la zona 1 y el de 3 relays mejor para la zona 2, debido a la distinta ubicación de los relays.



**Figura 21** Función de distribución para los usuarios de la zona 1.

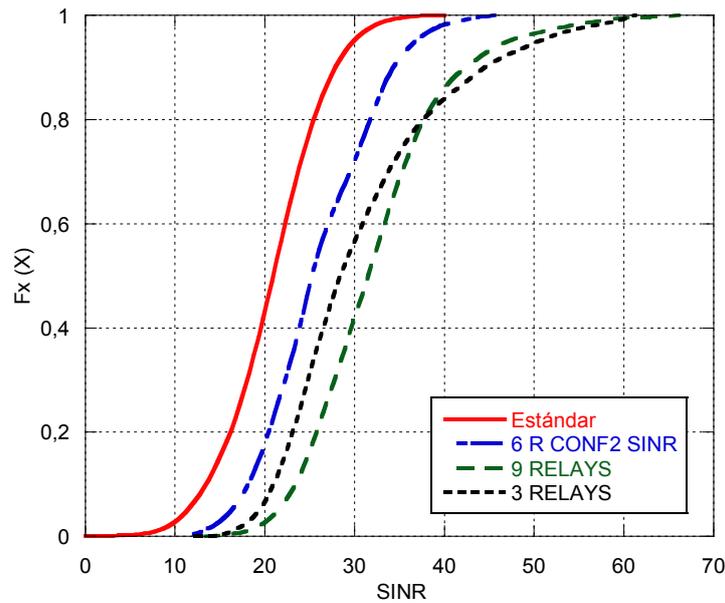


Figura 22 Función de distribución para los usuarios de la zona 2.

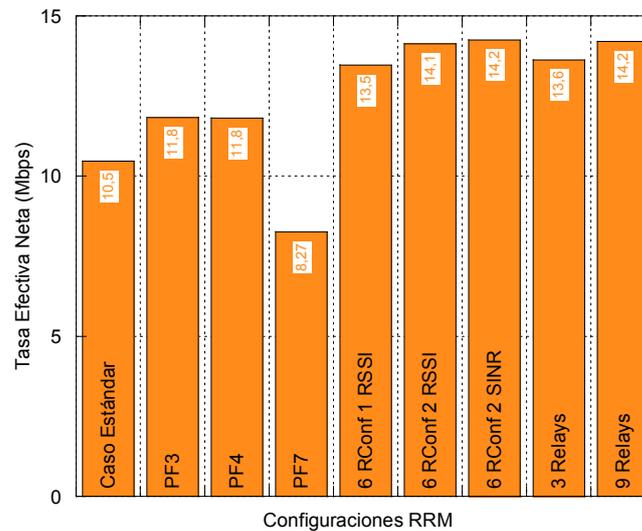
Sin embargo, no tiene sentido realizar la comparación de los distintos casos solo para la función de distribución, y es que, como se ha mencionado anteriormente, los relays tienen como objetivo no solo incrementar el nivel de SINR sino, reutilizar los recursos. Así pues, el mejor esquema será aquel que presente un buen compromiso entre la reutilización de los recursos y la interferencia generada por los mismos.

A continuación se realiza la comparativa de todos los escenarios respecto al caso estándar para obtener la ganancia real en términos de capacidad de la celda. La tabla 10 incluye la tasa neta alcanzada, conjuntamente con la ganancia total alcanzada en la celda y la ganancia en función de la zona. Una ganancia negativa, obviamente implica una pérdida de capacidad.

Global	Tasa Total (Mbps)	Z0 (Mbps)	Z1 (Mbps)	Z2 (Mbps)	Ganancia total %	Z0 %	Z1 %	Z2 %
Caso Estándar	10,465	5,2547	3,1792	2,0307	-	-	-	-
PF3	11,832	5,57	3,806	2,456	13	5,81	19,72	20,94
PF4	11,807	5,175	3,736	2,896	12,82	-1,51	17,51	42,61
PF7	8,265	2,679	3,022	2,564	-21	-49,02	-4,945	26,26
6 Relays Conf1 RSSI	13,465	7,264	3,74	2,461	28,67	38,24	17,64	21,2
6 Relays Conf2 RSSI	14,126	7,274	4,002	2,85	34,98	38,43	25,88	40,35
6 Relays Conf2 SINR	14,25	7,887	3,74	2,623	36	50	17,64	29,17
3 Relays	13,628	7,147	3,809	2,672	30,22	36	19,81	31,58
9 Relays	14,199	6,498	4,392	3,309	35,68	23,66	38,15	62,95

Tabla 10 Rendimiento por celda de los distintos escenarios y ganancia respecto al caso estándar.

Para la comparación de los distintos casos, no se ha tenido en cuenta la tasa transmitida por el enlace backhaul porque esta no supone un rendimiento real para los usuarios, al tratarse de overhead vinculada al funcionamiento del modo relay. Por tanto, solo se considera la ganancia neta de capacidad.



**Figura 23** Comparación de la tasa neta para las distintas configuraciones.

Cabe destacar que el aumento en capacidad conseguido con respecto a las estrategias PF7, PF4, PF7 es bastante notable. Llama la atención como algoritmos como el PF7 que presenta unas buenas condiciones de SINR para todos los usuarios, obtenga unos resultados tan pobres en el campo de tasa efectiva neta, esto es debido a la no reutilización de los recursos, muy necesaria para compensar el overhead que se origina en el backhaul.

Como se puede observar los esquemas que mayor tasa proporcionan son los de 6 relays configuración 2, 3 relays y 9 relays, justamente los esquemas que se han propuesto en este PFC.

Sin embargo se puede deducir como el aumento de entidades de tipo relay, no implica necesariamente un aumento en la capacidad del sistema, entre desplegar 6 o 9 relays no existe una diferencia en términos de capacidad que justifique el despliegue de más entidades. Esto se debe a que el mayor número de nodos intermedios implica que un mayor número de usuarios utilizan el modo relay lo que conlleva la necesidad de dos subtramas para finalizar la comunicación, es decir, la tasa máxima alcanzable en el acceso al relay siempre se verá afectada por un factor de reducción 2. Además el coste económico de los distintos esquemas es directamente proporcional al número de relays desplegados en los mismos.



# Capítulo 4: Conclusiones y Líneas Futuras

En este PFC se han estudiado distintos algoritmos de repartición de recursos para el enlace descendente en configuraciones de redes heterogéneas basadas en el despliegue conjunto de nodos de baja potencia (en concreto relays) y estaciones base estándar, basados en la misma tecnología LTE. En el contexto de desarrollo a futuro de las redes celulares de banda ancha basados en OFDMA, y en concreto en LTE, estas redes constituyen una solución prometedora ya que proporcionan una tasa efectiva y una homogeneidad en el servicio más elevada que los despliegues convencionales.

El propósito de los trabajos llevados a cabo ha sido maximizar el reuso frecuencial, para minimizar la reducción de capacidad que supone el overhead asociado al uso de dos enlaces en el modo relay en sustitución de un enlace de menor calidad (acceso estándar).

El estudio efectuado se ha centrado en despliegues con relays no transparentes (relays tipo 1, según la nomenclatura LTE) con duplexado temporal de los enlaces backhaul y acceso al relay.

Se han desarrollado varios esquemas de partición y reuso frecuencial para despliegues bajo la cobertura de celdas tri-sectorizadas, efectuándose un análisis comparativo de la capacidad alcanzada con las configuraciones relay (descontado ya el overhead asociado a las transmisiones sobre el enlace backhaul), frente a escenarios convencionales macrocelulares. Para la evaluación de los distintos esquemas se ha ampliado una plataforma de simulación de sistema ya existente, incorporando los esquemas de soporte analizados de transmisiones a través de nodos relay.

En los estudios efectuados se han considerado varios criterios de enganche: basados en RSSI, SINR. Asimismo, el desarrollo de estas estrategias se ha hecho considerando de forma integrada los esquemas de scheduling dinámico temporal y frecuencial, conjuntamente con la aplicación de esquemas de selección adaptativa de modulación y codificación (en definitiva de tasa de transmisión), tanto en los enlaces "backhaul" como de "acceso al relay".

Los estudios han incluido, a efectos comparativos, la evaluación de alternativas propuestas en la literatura (donde los estudios son todavía escasos y bastante recientes) y de propuestas propias. En concreto se han analizado las prestaciones de las principales propuestas identificadas en los trabajos en curso en este ámbito: PF7,

PF4, PF3. En todas estas propuestas se apuesta por la aplicación de un esquema de multiplexación frecuencial para las transmisiones relacionadas con los distintos relays que coexisten en el sistema, viéndose que la ganancia de los despliegues con nodos relays están muy limitada por el overhead asociado al backhaul. En general la aplicación de un mayor nivel de reuso repercute en un incremento potencial de la capacidad global, a costa de un incremento en la interferencia.

Para limitar el overhead asociado al backhaul se ha propuesto y evaluado un esquema alternativo, cuya característica más representativa es el reparto o distribución de las transmisiones backhaul dirigidas a los distintos relays en todas las subtramas. Es decir, se recurre a un esquema de multiplexado híbrido temporal y frecuencial. Para ello la estructura de subtramas ha cambiado permitiendo ráfagas de acceso al relay y backhaul en cualquier TTI.

Este esquema de alternancia, conjuntamente con la adecuada coordinación en la distribución de recursos frecuenciales, permite aplicar esquemas de reuso frecuencial dentro de cada celda en los tres enlaces involucrados, manteniendo la interferencia limitada y alcanzándose los objetivos de SINR necesarios para utilizar esquemas de modulación codificación elevados. En concreto, el esquema tiene como ventaja potencial la disponibilidad en cada subtrama de todos los recursos frecuenciales para las transmisiones macro, eliminando así el overhead asociado a las transmisiones del backhaul.

Los resultados obtenidos, considerando de forma explícita la implementación de la estrategias de scheduling frecuencial y temporal (y la inherente adaptación de tasa) en cada uno de los enlaces, muestran que esta propuesta mejora de forma sensible las prestaciones de otros esquemas de despliegue macro y relay. En concreto, se observa que la configuración 2 con 6 relays desplegados en la celda, ofrece una ganancia en la capacidad de la celda del 35%, respecto a una red celular convencional.

Para finalizar se han propuesto y analizado dos nuevos esquemas con un número de 3 y 9 relays, de los que se concluye que, un incremento en el número de relays desplegado no se traduce en un incremento neto de la capacidad del sistema, ya que el incremento de relays conlleva el incremento del overhead asociado al backhaul ante la imposibilidad de aplicar un esquema de reuso total de recursos dentro de la celda.

En definitiva, el despliegue de relays resulta de gran interés para aquellos usuarios más alejados respecto a la estación base, sin embargo este tipo de solución no se encuentra exenta de problemas que se han de investigar en un futuro.

La implementación de esquemas de reparto dinámico de recursos en entre los distintos enlaces, en función de la distribución de carga y de usuarios es el siguiente paso a analizar con el objetivo, de aprovechar al máximo cada uno de los escasos recursos de los que se dispone en la celda. De esta manera la R\_BS sería capaz de asignar un número mayor de recursos a aquel relay ubicado en una zona de alta densidad de usuarios, en contra de relays cuya ocupación fuese mínima.

También se deben investigar los algoritmos de selección de entidad, ya que estos deberían de tener en cuenta parámetros como los recursos necesarios extra para cursar su comunicación en modo relay, para saber de antemano si existe una ganancia real en la misma.

Además las simulaciones se han realizado con tráfico full-buffer y scheduling PF, sería interesante obtener el comportamiento de la red con distintos tipos de tráfico y scheduling, para observar si se cumplen los requisitos de calidad de servicio "Quality of Service", especialmente en aquellos servicios donde el retardo sea crítico.

# REFERENCIAS

- [1] <http://3g4g.blogspot.com/2007/06/ofdm-and-ofdma-difference.html>
- [2] 3GPP TSG RAN WG1#42 R1-050764, "Inter-cell Interference Handling for E-UTRA", Ericsson, Agosto-Septiembre 2005.
- [3] 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.
- [4] Xue Jun Li, Boon-Chong Seet, Peter Han Joo Chong, "Multihop cellular networks: Technology and economics", Computer Networks 52 (2008), 1825–1837.
- [5] 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.
- [6] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, "Fundamentals of WiMAX", Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series", Prentice Hall, 2007.
- [7] <http://www.3gpp.org/LTE>
- [8] 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.
- [9] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #59 R1-094518, "Type 1 definition and inband/outband", Panasonic, LG Electronics, Samsung, Ericsson, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [10] 3GPP TSG RAN WG1#59 R1-094461, "DL Performance Evaluation of Type-II Relay", Research In Motion, UK Limited, Jeju, Korea, Noviembre 2009.
- [11] 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.

- [12] 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.*
- [13] 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.
- [14] 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.*
- [15] 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*
- [16] 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*
- [17] Özgür Oyman, "Opportunistic Scheduling and Spectrum Reuse in Relay-based Cellular OFDMA Networks", *IEEE Communications Society GLOBECOM 2007.*

# Anexo A: CONDICIONES DE EVALUACIÓN

Las simulaciones para la comparación de las distintas propuestas de RRM se han realizado sobre una plataforma de evaluación programada en C++, en la que se han incorporado los nuevos nodos relay y toda la funcionalidad asociada a la comunicación con estos. Los parámetros generales del sistema utilizados en las simulaciones siguen las especificaciones de los trabajos relacionados con esta temática encontradas en la literatura, extraídos fundamentalmente de fuentes como el 3GPP e IEEE [13].

Como se puede observar en la tabla A.2, el simulador además de los modelos de propagación, también modela desvanecimientos lentos y rápidos sufridos por el canal, lo que se traduce en la obtención de unos resultados más próximos a la realidad. El enlace backhaul ha sido implementado en su totalidad, lo que permite extraer datos más fiables en términos de overhead real e interferencias.

Para los desvanecimientos Rayleigh se han aplicado los modelos extendidos propuestos en E-UTRA [13] y que se muestran en la Tabla A.1. En la realidad, la respuesta frecuencial del canal varía con el tiempo como resultado principalmente del desplazamiento del terminal móvil. Para modelar este efecto, la potencia de los rayos del canal varía temporalmente de acuerdo al modelo clásico de Jakes, que depende de la velocidad de desplazamiento del terminal.

Pedestrian A extendido (3km/h)		Vehicular A extendido (30km/h)		Typical Urban extendido (120km/h)	
Retardo del camino (ns)	Potencia relativa (dB)	Retardo del camino (ns)	Potencia relativa (dB)	Retardo del camino (ns)	Potencia relativa (dB)
0	0,0	0	0,0	0	-1,0
30	-1,0	30	-1,5	50	-1,0
70	-2,0	150	-1,4	120	-1,0
90	-3,0	310	-3,6	200	0,0
110	-8,0	370	-0,6	230	0,0
190	-17,2	710	-9,1	500	0,0
410	-20,8	1090	-7,0	1600	-3,0
		1730	-12,0	2300	-5,0
		2510	-16,9	5000	-7,0

Tabla A.1 Modelos de propagación multicamino.

Parámetros		Suposiciones	
System Layout		21 celdas y 3 sectores/celda .Técnica wrap-around para evitar efectos de borde en las celdas del extremo del despliegue.	
Inter-site distance (ISD)	Case 1	500 m	
	Case 3	1732 m	
Distancia mínima entre R_BS y RS o UE		35m	
Distancia mínima entre RSs		40m	
Distancia mínima entre RS y UE		10m	
Ancho de banda del sistema		5MHz	
Periodo de scheduling (TTI)		1ms	
Número de RBs		27	
Tamaño del RB		12 subportadoras (15KHz/subportadora) OFDM durante 1 TTI (10 símbolos útiles OFDM)	
Modelos de propagación (con R en Kilómetros)	R_BS→UE	LOS	$PL_{LOS}(R) = 103.4 + 24.2 \log_{10}(R)$
		NLOS	$PL_{NLOS}(R) = 131.1 + 42.8 \log_{10}(R)$
	R_BS→RS	LOS	$PL_{LOS}(R) = 100.7 + 23.5 \log_{10}(R)$ Ganancia de 5dB entre la R_BS y los RS bajo su dominio.
		NLOS	$PL_{NLOS}(R) = 125.2 + 36.3 \log_{10}(R)$
	RS→UE	LOS	$PL_{LOS}(R) = 103.8 + 20.9 \log_{10}(R)$
		NLOS	$PL_{NLOS}(R) = 145.4 + 37.5 \log_{10}(R)$
	RS→RS	LOS	$PL_{LOS}(R) = 100.7 + 23.5 \log_{10}(R)$
		NLOS	$PL_{NLOS}(R) = 125.2 + 36.3 \log_{10}(R)$
Shadowing Desviación estándar (dB)	R_BS→UE	8dB	
	R_BS→RS	2dB	
	RS→UE	10dB	
	RS→RS	2dB	
Distancia de coherencia de los desvanecimientos lentos		50m	
Shadowing Correlación		0.5	
Modelo de desvanecimientos Rayleigh		Velocidad del UE (km/h)	Modelo de desvanecimientos Rayleigh
		3	Pedestrian-A extendido
		30	Vehicular-A extendido
		120	Typical Urban extendido
Modelo del espectro Doppler		Jakes	
Densidad espectral de ruido térmico en el RS/UE		-174 dBm/Hz	
Figura de ruido del RS		5dB	
Figura de ruido en el UE		9dB	
Potencia de ruido/RB en el RS		-116.44dBm/RB	
Potencia de ruido/RB en el UE		-112.44dBm/RB	
Potencia Maxima	R_BS	43dBm	
	RS	37dBm	
	UE	24dBm	

**Tabla A.2** Parámetros generales de las simulaciones

La potencia de transmisión disponible para la estación base y los relays, que ha de ser repartida entre el total de recursos disponibles en cada entidad, se ha mantenido constante en todas las simulaciones, siendo de 43dBm y 37dBm, respectivamente.

En la Tabla A.2 quedan recogidos los parámetros generales de las configuraciones de las distintas antenas presentes en el escenario. Como se ha explicado en la memoria el relay monta dos antenas diferentes, una antena directiva utilizada para el enlace backhaul y otra omnidireccional para el access.

Configuración de antena	R_BS	<i>Ganancia diversidad</i>	Transmisión	3dBi (2 antenas TX, 2 antenas RX por sector)
			Recepción	3dBi (2 antenas TX, 2 antenas RX por sector)
		<i>Ganancia de antena</i>	14dBi	
		<i>Diagrama radiación</i>	Direccional con $A(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ $A_m = 25dB$ y $\theta_{3dB} = 70^\circ$	
Configuración de antena	RS	R_BS↔RS TX/RX	<i>Ganancia diversidad</i>	3dBi 2 antenas (TX/RX half duplex)
			Ganancia de antena	7dBi 2 antenas (TX/RX half duplex)
			<i>Diagrama radiación</i>	Direccional con $A(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ $A_m = 20 dB$ y $\theta_{3dB} = 70^\circ$
		RS↔UE TX/RX	<i>Ganancia diversidad</i>	3dBi (2 antenas TX/RX)
			<i>Ganancia de antena</i>	5dBi
			<i>Diagrama radiación</i>	Omnidireccional
	UE	R_BS↔RS RS↔UE	<i>Ganancia diversidad</i>	3dBi (2 antenas TX y 2 antenas RX)
			<i>Ganancia antena</i>	0dBi
			<i>Diagrama radiación</i>	Omnidireccional

**Tabla A.3** Parámetros generales de configuración de antena

Por otro lado, el modelo de tráfico implementado para la simulación es *full-buffer* y el tipo de *scheduling* utilizado para la asignación de una prioridad a los usuarios a la hora de recibir servicio en función de sus condiciones es el PF (*Proportional Fair*) [14].

La tabla A.4 resume las especificaciones del diseño descritas anteriormente:

TTI	1ms
Modelo de tráfico	Full buffer
Scheduling temporal	PF
Scheduling frecuencial	El mejor RB para cada usuario
MCS	1 RB por usuario (MCS adaptativa)

**Tabla A.4** Parámetros dependientes del scheduling y del servicio.

Para el conocimiento de la calidad de canal entre cada UE y el R\_BS o RS se realizan medidas CQI (*Channel Quality Indicator*), estas son promediadas durante una ventana temporal de duración  $W_{CQI}$ , y utilizadas por el *scheduler* tras un retardo temporal de  $t_{CQI}$ . Estos parámetros quedan recogidos en la Tabla A.5.

Parámetros	Valores
$W_{CQI}$	4ms
$\Delta_{CQI}$	1ms
$t_{CQI}$	2ms

**Tabla A.5** Parámetros del modelo de CQIs.

Por último la relación entre las modulaciones utilizadas y la SINR conseguida en un enlace viene incluida en la Tabla A.6, la SINR umbral es aquella para la que se consigue una probabilidad de error del 1%.

MCS	Configuración	SINR umbral (dB)	Tasa de datos (bits/RB)
0	QPSK 1/2	10,2	120
1	QPSK 3/4	14	180
2	16QAM 1/2	17,5	240
3	16QAM 3/4	21,4	360
4	64QAM 2/3	27,4	480
5	64QAM 3/4	29,5	540

**Tabla A.6** SINR umbral y tasa de datos para cada MCS.

## Anexo B: TIPOS DE RELAY

Como se menciona en el apartado 2 de la memoria, existe una gran diversidad de opciones de implementación para el relay atendiendo al nivel de la pila de protocolos en el que el tráfico de usuario es retransmitido y a las funciones habilitadas en el plano de control.

La tabla B.1 contiene un resumen de las distintas alternativas consideradas, incluyendo los escenarios de posible aplicación de cada uno de ellos. La variedad de opciones es amplia, pero es posible establecer, de forma genérica, las ventajas e inconvenientes de determinados tipos de configuración para este tipo de relays (L1 L2 o L3) en función del escenario de uso:

Asumiendo, por ejemplo, la conveniencia de considerar un relay transparente para el usuario de bajo coste (por ejemplo, de acuerdo con la propuesta de LTE de considerar relays tipo 2); podría considerarse el uso de un relay L1 o L2a. El hecho de que el relay L2 decodifique la señal antes de retransmitirla implica que el ruido y la interferencia no se reenvían. Así que, si en lugar de usar un relay L1 como simple repetidor, se usa un relay L2 con la mínima funcionalidad, el nivel de interferencia bajará y la calidad de la transmisión mejorará sustancialmente. No obstante, el proceso de decodificación aumenta el retardo, que en este caso puede ser de varias subtramas.

En el caso de considerar relays no transparentes para el UE, se puede optar por relays tipo L2 con alta funcionalidad o L2. En lo referente por ejemplo a la funcionalidad de gestión de movilidad, si los UEs tienen un nivel de movimiento bajo, el número de handovers que se produce entre relays es bastante limitado, y por tanto resulta interesante considerar relays de nivel L3, ya que la implementación de funciones RRC asociadas a la gestión de movilidad, QoS y RRM (con cierto grado de cooperación con la estación base) puede permitir una respuesta más rápida a cambios en condiciones de canal y reducir la señalización entre T\_UEs y T\_BSs, limitando el gasto innecesario de recursos.

En el caso de UEs de alta movilidad entre RS, las ventajas de la gestión de movilidad por parte del relay no son claras, ya que obliga a un intercambio frecuente de información de contexto entre RSs. En este caso, la funcionalidad del relay de nivel L2 puede ser más apropiada. En cualquier caso, la implementación de la función de scheduling, HARQ y selección adaptativa de MCS en el relay, permite mejorar la calidad de las transmisiones. El balance de carga entre relays también es posible bajo el control de la estación base.

Tipo	Características generales Esquema de funcionamiento	Nivel de procesado en el UP	Funcionidad requerida en el T_RS en el plano de control	Posible escenarios de aplicación
L1:	<p><i>Amplificación y reenvío/ Modulación y reenvío.</i></p> <p>Retransmisión en los mismos recursos frecuenciales.</p> <p>Bajo retardo (menor TTI).</p> <p>No requiere señalización..</p> <p>No se implementa la funcionalidad MAC</p>	Físico	<p>Funcionalidad RF.</p> <p>Codificación/decodificación CRC.</p>	<p>Extensión de cobertura.</p> <p>Servicios sensibles al retardo.</p>
L2 a)	<p><i>Posible transmisión cooperativa en el DL entre T_R_BS y T_RS y/o, entre T_UE y T_RS en el UL.</i></p> <p>Requiere, en caso de transmisión cooperativa, que el T_UE esté bajo la cobertura de T_RS y T_R_BS.</p> <p>Scheduling centralizado en la T_R_BS.</p> <p>HARQ extremo a extremo para la comunicación T_R_BS a T_UE. (no excluye la aplicación de HARQ entre T_R_BS y T_RS).</p> <p>El T_RS puede y suele ser transparente para el T_UE (recibe la información de control directamente de la T_R_BS).</p>	Bloque de transporte	<p>Funcionalidad RF.</p> <p>Codificación/decodificación CRC.</p> <p>HARQ.</p>	<p>Extensión de cobertura.</p> <p>No muy apropiado para incrementar la capacidad (la viabilidad de aplicar un scheduling adaptativo eficiente, en función de las condiciones de canal está muy limitada).</p>
L2 b)	<p>HARQ nodo a nodo.</p> <p>El T_RS no es transparente para el T_UE.</p> <p>Scheduling centralizado. El scheduling se lleva a cabo en la T_BS. La principal ventaja es que la asignación de recursos a los T_UEs que cuelgan del T_RS se puede hacer en toda la banda frecuencial, lo que incrementa la ganancia por diversidad frecuencial. Por otra parte, las medidas de calidad son reportadas por el T_UE directamente a la estación base (reenviadas por el T_RS).</p>	<p>Por encima de HARQ</p> <p>MAC PDU</p> <p>RLC PDU</p>	<p>Funcionalidad RF.</p> <p>Codificación/decodificación y CRC.</p> <p>HARQ.</p> <p>Bajo el control de la T_R_BS (opcional): configuración adaptativa de MCS y /o segmentación y reensamblado RLC.</p>	<p>Extensión de cobertura.</p> <p>Incremento de Capacidad.</p>
L2 c)	<p>HARQ nodo a nodo.</p> <p>El T_RS no es transparente para el T_UE.</p> <p>Scheduling distribuido. Permite un scheduling rápido que explota mejor la diversidad multiusuario y de canal.</p> <p>La asignación de recursos para la comunicación entre T_UE y T_RS debe hacerse en coordinación con la T_R_BS y con otras T_BSs y T_RSs vecinas, a fin de controlar la interferencia y la carga. El T_RS no es transparente para el T_UE.</p>	<p>Por encima de HARQ</p> <p>MAC PDU</p> <p>RLC PDU</p>	<p>Funcionalidad RF.</p> <p>Codificación/decodificación y CRC.</p> <p>HARQ.</p> <p>Scheduling.</p> <p>Selección adaptativa de MCS y /o segmentación y reensamblado RLC.</p> <p>Control de potencia.</p> <p>Gestión de interferencia.</p> <p>El procedimiento de handover se produce únicamente entre la T_BS y el T_UE o entre la T_BS y el T_RS.</p>	<p>Extensión de cobertura.</p> <p>Incremento de Capacidad.</p>
L2/L3.	<p>Idem L2 c).</p> <p>Gestión de movilidad y establecimiento de conexiones.</p>	<p>Por encima del nivel RLC</p>	<p>Idem L2 c).</p> <p>RRC. Activación y control de conexiones.</p> <p>RRC. Gestión de movilidad.</p>	<p>Extensión de cobertura.</p> <p>Incremento de Capacidad.</p>
L3	<p>HARQ nodo a nodo.</p> <p>Scheduling distribuido.</p> <p>Toda la funcionalidad RRC propia de una T_BS.</p>	Nivel IP	<p>Idem L2 c).</p> <p>Funcionalidad RRC completa.</p>	<p>Extensión de cobertura.</p> <p>Incremento de Capacidad.</p>

**Tabla B.1** Resumen de opciones de implementación del relay