

Anexos

Anexo A:

Tipos de estaciones Relay

En este anexo se hace un estudio sobre las estaciones relay, las aplicaciones para las cuales puede resultar de interés su inclusión en la infraestructura de un sistema de comunicaciones móviles, y los diferentes tipos de nodos relay que pueden encontrarse, clasificados atendiendo a diversos criterios.

A.1. Aplicaciones de los nodos Relay

Los sistemas relay multsalto se presentan como una alternativa interesante para mejorar la cobertura y capacidad de las nuevas redes móviles de banda ancha OFDMA, tales como IEEE 802.16–WiMAX o 3GPP-LTE. Las ganancias en cobertura y capacidad que proporcionan pueden ayudar a reducir el coste necesario de despliegue de la red para garantizar unas determinadas prestaciones sin la necesidad de diseñar expresamente nuevos equipos terminales, sino modificando ligeramente las estaciones base e incluyendo los nodos relay, pero dando soporte a los terminales estándar. Así pues el modo relay posibilita la comunicación entre terminales utilizando un nodo/estación intermedio como acceso a la red en la comunicación extremo a extremo [23]-[24].

Existen varias necesidades para las que la adición de nodos relay puede resultar una opción interesante:

- **Relays para extender la cobertura de una estación base** (optimización del tamaño del área de servicio).

Una estación relay puede usarse para extender la cobertura de una estación base, tal como se muestra en la Figura A.1. En este caso en el que las estaciones relay (RS) se sitúan fuera del área de cobertura de la BS, es necesario utilizar en ésta una antena de mayor ganancia para conectar ambas entidades de modo que las comunicaciones directas de la BS con los UEs se realicen a través de unas antenas y las comunicaciones de la BS con los RS, a través de otras. Cuanto mayor sea la ganancia de las antenas en el enlace entre la BS y el RS, mayor será la capacidad disponible en este último (pues el enlace prestará una mayor SINR y el *throughput* será mayor). Por otra parte, en este escenario muchos UEs no podrán escuchar a la BS, por lo que toda la información y señalización necesarias para la operación de los usuarios tendrá que ser transmitida y/o retransmitida por los RSs. Las nuevas estaciones base modificadas para el soporte de las comunicaciones en modo relay se denominan R_BS.

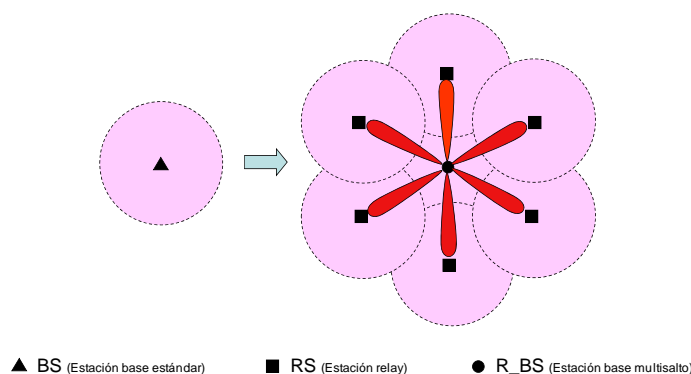


Figura A.1 . Uso de Estaciones Relay para extender la cobertura.

- **Relays para aumentar la capacidad de la célula** y disminuir la potencia transmitida. Una estación relay puede usarse para aumentar la capacidad en las regiones periféricas de la célula, como se muestra en la Figura A.2 . Esta solución es también útil para minimizar la potencia de transmisión de la R_BS, RSs y UEs. La disminución de la potencia de transmisión de los terminales redundante en un menor consumo de energía, mientras que en la R_BS y RS conlleva además una disminución del coste del hardware. En este caso, un único enlace con una SINR baja se reemplaza por un par de enlaces con mayor SINR sobre los cuales es posible soportar esquemas de modulación y codificación (MCS) de orden superior, incrementando así la tasa de transmisión. El incremento en la eficiencia espectral se traduce en un incremento de la capacidad que puede repercutir en un mayor *throughput* por usuario o en un número superior de usuarios soportables.

En este escenario, todos los usuarios de la célula pueden escuchar al relay, por lo que éste les puede enviar información de control.

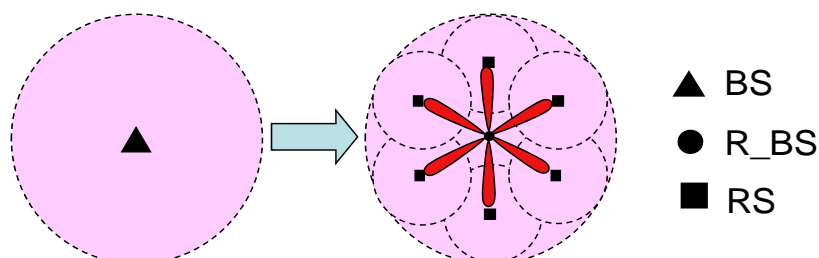


Figura A.2 . Uso de Estaciones Relay para aumentar la capacidad en los bordes de la célula y balancear la capacidad en el área celular

Así, en definitiva lo que se pretende gracias a la inclusión en la infraestructura de los nodos relay es, para las aplicaciones de mejorar la capacidad dentro de la propia celda, sustituir el enlace directo para los casos en que un usuario va a comunicarse a través de un relay por dos enlaces (enlace "backhaul" entre la estación base y el relay y enlace "access" o "acceso-relay" entre el relay y el usuario), de mejores características (Figura A.3).

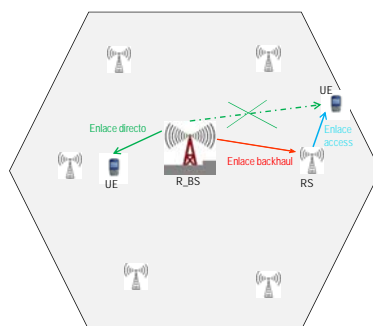


Figura A.3 . Celda en modo relay

- **Relays para proporcionar cobertura en zonas de sombra.**

Una estación relay puede usarse para proporcionar cobertura allí donde no alcanza la señal de la estación base o mejorar el *throughput* en zonas de desvanecimientos provocados por edificios u otro tipo de construcciones, en zonas de valle entre edificios altos, etc., tal como se muestra en la Figura A.4 . Se trata de una situación equivalente a la de extensión de la cobertura de una estación base.

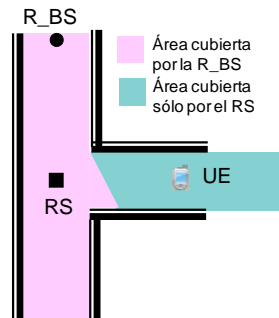


Figura A.4 . Uso de Estaciones Relay para cubrir zonas de sombra

En líneas generales los nodos relay pueden constituir parte de la propia infraestructura, siendo entidades fijas diseñadas para tener un enlace muy directivo y de buenas características con la estación base, o nodos móviles implementados dentro de escenarios concretos en el que se requieran servicios auxiliares por situaciones de carácter puntual. Incluso se puede barajar la idea de que un propio terminal móvil realice las funciones de nodo relay.

Además de la posibilidad de la inclusión de relays a nivel de celda existe otro tipo de implementación a nivel de la red global en el que cada estación relay podría ser compartido por diferentes estaciones base para dar servicio a los usuarios del exterior de las diferentes celdas que lo comparten [8], como se observa en la Figura A.5 .

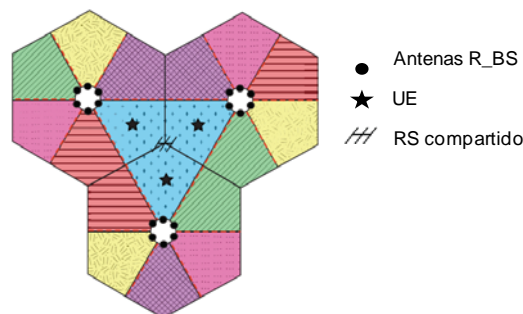


Figura A.5 . Uso de nodos relay compartidos por varias celdas

La inclusión en la infraestructura de los nodos relay presenta ventajas a la hora de servir usuarios problemáticos en cuanto a condiciones de canal mediante un despliegue de red más sencillo al generado si se propusiera la adición de nuevas estaciones base. Los costes son más reducidos, las nuevas entidades más simples, no requieren cableado adicional, transmiten con menor potencia y pueden ser localizados y utilizados de múltiples formas según las necesidades específicas a cubrir, por lo que su implementación es muy flexible. Como consecuencia aparecen algunos aspectos negativos como un retardo adicional en la comunicación, el consumo de recursos radio cuando los relays operan en la misma banda frecuencial que las transmisiones estándar, o la necesidad de múltiples transceptores y espectro frecuencial cuando se opera en diferente banda.

A.2. Scheduling en modo relay

Desde el punto de vista de la gestión de recursos radio y debido a la inclusión en la infraestructura de estas nuevas entidades, las estaciones relay, se pueden plantear en el modo multisalto los siguientes esquemas de *scheduling* [25]-[26]:

- **Esquema centralizado:** la estación base tiene control total sobre el *scheduling* de la estación relay y decide cómo debe gestionar los recursos disponibles.
- **Esquema distribuido:** la estación relay controla directamente a los terminales móviles que acceden a través de él. De este modo, el propio relay decide los recursos que asigna a cada móvil y realiza el *scheduling* de manera independiente.

El *scheduling* centralizado implica que el relay carece o tiene una funcionalidad muy limitada a este nivel. La R_BS recoge información de nivel físico del UE y decide el *scheduling* en base a dicha información. Desde el punto de vista del RS existen dos posibilidades: que éste siga las indicaciones de *scheduling* de la R_BS y construya su propio canal de control (PDCCH-Physical Downlink Control CHannel) de acuerdo con ello, o que el RS repita el PDCCH sobre la interfaz RS a UE. La implementación de cada una de estas alternativas depende de si el RS tiene su propio cell-ID (Identity) o no. Las características principales del *scheduling* centralizado son:

- Un único *scheduler* se encarga de la asignación de recursos en los enlaces R_BS a RS y RS a UE, y de seleccionar un bloque de datos compatible para ambos enlaces. No obstante el scheduler es más complejo.
- La R_BS precisa recibir información del canal del UE, lo que introduce retardo adicional sobre la estimación del estado del canal implicando una mayor dificultad de la R_BS para seguir las variaciones del canal.
- Se incrementa la señalización entre el RS y la R_BS: información de *scheduling*, informes sobre el estado del canal entre el RS y UE, información sobre el estado de los búferes de tráfico de los UE, etc.
- Incremento en el retardo.

En el *scheduling* distribuido, el propio relay será quien 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.

A.3. Tipos de estaciones relay

Los nodos relay pueden implementarse de manera flexible atendiendo a diversos aspectos en función de las necesidades de la red y de los objetivos que pretendan alcanzarse con la inclusión de los mismos.

Dependiendo de la banda frecuencial en la que va a trabajar el relay para comunicarse con los usuarios a los que va a dar servicio se plantea la siguiente clasificación de nodos relay [23]-[24]:

- **Inband:** el enlace *backhaul* trabaja en la misma banda frecuencial que el enlace directo, es decir las comunicaciones entre nodo relay y sus usuarios se establecerán sobre los mismos recursos que las comunicaciones entre la estación base y los relays.
- **Outband:** las bandas frecuenciales para el enlace que comunica estaciones base y relays y el enlace que comunica relays con los usuarios a los que va a dar servicio son diferentes.

En función de si los relays poseen una o varias cadenas radio se pueden clasificar en:

- **Half-duplex:** los relays contienen únicamente una entidad radio por lo que o bien operan en modo transmisión o bien lo hacen en modo recepción, pero no en ambos simultáneamente. La transición entre ambos modos requiere un gasto temporal.

- **Full-duplex:** contienen varias entidades radio por lo que son capaces de operar en modo transmisión y recepción simultáneamente.

En última instancia, si se atiende al nivel de la pila de protocolos en el que el tráfico de usuario es retransmitido y las funcionalidades habilitadas en el plano de control, podríamos identificar las siguientes opciones de estaciones relay [9]-[15]:

- **Relay de nivel 1.** Su funcionamiento es análogo al de un simple repetidor, que se caracteriza por la retransmisión del tráfico de usuario en el nivel 1 (capa física), por lo que puede ser denominado relay de nivel 1 o L1 (Layer 1). Únicamente efectúan una amplificación de la señal recibida (AF: Amplify-and-Forward), por lo que estos relays introducen un retardo menor que otras soluciones que operan en capas superiores. Sin embargo, al no realizar la decodificación de la señal, amplifican por igual la señal útil y el ruido más interferencias, por lo que la SINR a la salida no mejora respecto a la entrada. La retransmisión puede conllevar o no un cambio de frecuencia. En el caso de que la frecuencia no cambie, es necesario incorporar algún tipo de funcionalidad para cancelar o mitigar la interferencia que el transmisor del repetidor introduce en su propio receptor. Conceptualmente, estos repetidores, pueden ser vistos como un simple amplificador analógico, si bien pueden incorporar algunas funcionalidades más avanzadas.

Este tipo de relay necesariamente usa el mismo identificador de celda que la R_BS que le da servicio, ya que únicamente se limita a retransmitir la señal de ésta. Esto implica que es totalmente transparente para el UE, quien no es capaz de distinguir si está recibiendo servicio directamente de la R_BS o bien del RS. La función de *scheduling* está necesariamente localizada en la R_BS.

Existen varias implementaciones posibles para este tipo de relay:

- El RS se limita a amplificar y retransmitir la señal recibida en la misma banda frecuencial. El retardo introducido es muy pequeño, y como 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.
- El RS amplifica sólo una porción del ancho de banda. Esta parte está pre-determinada y es semi-estáticamente asignada por la R_BS. La amplificación de sólo una porción del ancho de banda implica que el RS debe procesar la señal (FFT/IFFT: Fast Fourier Transform/ Inverse Fast Fourier Transform), lo que supone un retardo de uno o más símbolos OFDMA. Sin embargo, para garantizar el aislamiento entre transmisión y recepción, se evita que el RS transmita y reciba simultáneamente sobre el mismo recurso frecuencial.
- El RS procede a la ecualización del canal, demodulación y modulación de la señal, con lo cual se aplica cierto grado de adaptación del canal. Como el RS demodula y modula la señal, debe leer el PCFICH (Physical Control Format Indicator CHannel) y PDCCH para obtener la información de *scheduling* con la información de MCS.

En todos los casos, el RS necesita recibir los canales comunes (BCH-Broadcast CHannel) de la celda para obtener datos sobre la configuración de la misma. La principal ventaja de los dos primeros tipos de repetidores es que introducen un retardo muy pequeño. No obstante, también presentan serios inconvenientes como el hecho de amplificar todas las señales, incluso cuando no se usan, como por ejemplo cuando un UE tiene buenas condiciones de canal o está lejos del RS, lo que crea interferencia adicional en las estaciones base vecinas. Además, si el relay no transmite en todas las subtramas, los UEs observan grandes variaciones en el canal a través de las mismas, lo que produce un incremento de los errores en la estimación del canal y en la transmisión. Adicionalmente

hay que tener en cuenta que el relay no puede aplicar control de potencia independiente a las transmisiones con el UE, y que se amplifica el ruido y la interferencia. Así, se requiere aislamiento entre transmisión y recepción.

- **Relay de nivel 2.** Un relay de nivel 2 (L2: Layer 2) se caracteriza por la retransmisión del tráfico de usuario en el nivel 2. Como el nodo relay descodifica y codifica de nuevo (DF: Decode and Forward) los bloques de datos recibidos (y posiblemente también los reensambla y segmenta), se origina un retardo que puede ser apreciable (mayor de un TTI). Sin embargo, el ruido y la interferencia que puedan existir a la entrada no son retransmitidos por el nodo relay y pueden incorporarse técnicas de adaptación de la modulación y de la codificación (AMC: Adaptive Modulation and Coding) en cada enlace. El hecho de que el reenvío se haga a nivel 2 no implica que toda la funcionalidad de control de nivel 2 esté en el relay. Del mismo modo que para un relay de nivel 1 existen diversas alternativas tecnológicas, la variedad de posibilidades de definición y especificación de un relay de nivel 2 es muy extensa y puede ir desde la utilización de una única antena y la implementación de una gestión de recursos radio centralizada en la estación base, a un nodo relay que implemente prácticamente todas las funcionalidades de una estación base. Algunos aspectos que distinguen las diferentes soluciones son:
 - Número de saltos soportados (desde limitado a dos saltos hasta ilimitado).
 - Topologías soportadas (en árbol, es decir, restringido a una única ruta, versus topología mesh, en la que son posibles múltiples rutas).
 - *Scheduling* centralizado o distribuido.
 - Consciencia o no por parte de los usuarios de la existencia de los relays.
 - Operación *half-duplex* o *full-duplex* de los relays.
 - Subnivel de la capa 2 en el que se produce la retransmisión de los datos de usuario (MAC, RLC-Radio Link Control-, etc.).

En este caso, es necesario definir nuevos procedimientos y técnicas que afectan tanto al nivel 1 como al nivel 2. Dada la mayor flexibilidad y potencialidad de este tipo de relays, así como las implicaciones que conlleva en los aspectos de gestión de recursos radio y de gestión de la movilidad, parece la solución más adecuada para la mejora del funcionamiento de las redes móviles actuales.

- **Relay de nivel 3.** Un relay de nivel 3 (L3: Layer 3) se caracteriza por la retransmisión del tráfico de usuario utilizando el nivel IP (Internet Protocol). Además de las funcionalidades de nivel 2, el relay alberga parcial o totalmente las funciones de RRC (Radio Resource Control) que contempla una estación base (por ejemplo: procedimiento de establecimiento de llamada, gestión de movilidad, etc.). Se trata prácticamente de una estación base de baja potencia.

En líneas generales, es posible identificar distintos escenarios de despliegue, para los que es preciso analizar la conveniencia de usar uno u otro tipo de relay. En particular:

- **Despliegues en áreas rurales.** En este caso, el objetivo es conseguir cobertura ubicua con un coste reducido. El análisis del escenario arroja, por norma general, un entorno que es poco cambiante alrededor del UE y del RS. La existencia de visión directa entre el UE y R_BS o el RS es la situación predominante, por lo que lo normal es que la densidad de RS sea baja y el radio de cobertura de los mismos alto. Las características generales del escenario implican un despliegue fijo de RSs que sirven un área relativamente grande con una densidad de usuarios baja, lo que implica que el throughput por usuario es alto. El nivel de señal que los UEs reciben de las R_BSs es bajo en la zona de cobertura del RS, lo que dificulta la descodificación de la señal de control, por tanto el RS debería retransmitirla. La diferencia entre la potencia de transmisión de la R_BS y el RS no es demasiado grande. La distancia entre R_BS y RS puede ser alta, lo que implica que la señal en el RS se recibe

con baja SINR. En este contexto, el uso de un repetidor L1 no es adecuado, ya que amplifica también el ruido y la interferencia, provocando una degradación de la SINR. Es preferible el uso de repetidores L2 o L3.

- Cobertura en zonas urbanas con alta densidad de usuarios (Urban Hot Spot). En este caso, el objetivo del despliegue de relays es incrementar el *throughput* y se puede considerar el despliegue fijo o nómada de relays. Los relays sirven un área relativamente pequeña. En consonancia, la potencia transmitida es baja. El nivel de aislamiento de la cobertura del relay es bajo. En este escenario, la acumulación de ruido que se produce en las transmisiones con relays de nivel 1, puede provocar una degradación del *throughput* global. Interesa aplicar estrategias de nivel MAC, corrección de errores, HARQ (Hybrid Automatic Report reQuest) y *scheduling* dinámico para proporcionar un tratamiento diferenciado a los usuarios en función de las condiciones que experimenten. Por tanto, es preferible la consideración de relays de nivel L2 o L3.
- Cobertura de puntos de sombra. En este caso, el despliegue de los relays es fijo y preplanificado. Presenta unas características similares a las del escenario anterior, excepto que en este caso el aislamiento de la cobertura del relay con respecto a la de la estación base es alta. Considerando este aislamiento, en principio el nivel de interferencia sería más bajo y sería posible el uso de relays de nivel L1, que son más económicos. Sin embargo debido a las mejores prestaciones que ofrecen conviene considerar el uso de relays de nivel L2 y L3.
- Cobertura en zonas interiores con alta densidad de usuarios (Indoor Hot Spot). El principal reto de estos escenarios es combatir el shadowing y las pérdidas de penetración en espacios interiores. El objetivo es aumentar el *throughput*, ya que los requisitos del mismo en este entorno pueden ser elevados. Las características del escenario son bastante parecidas a las del escenario *Urban Hot Spot* con la diferencia de que en este caso el despliegue puede no ser preplanificado. Al igual que en los dos casos anteriores, para obtener el máximo *throughput* posible, interesa aplicar control estricto sobre el tráfico, mediante la aplicación de *scheduling* y otras técnicas de gestión de recursos radio. Por tanto, es preferible la consideración de relays de nivel L2 o L3.
- Grupos móviles. El objetivo es proporcionar mayor *throughput* y reducir las interrupciones por *handover* a los usuarios que viajan, por ejemplo, en transporte público (tren, autobús, etc.). El acceso entre el RS y el UE es bastante estable. Sin embargo, el enlace R_BS a RS puede ser un cuello de botella. En principio es preferible el uso de relays de nivel L2 o L3.
- Despliegues de emergencia o redes temporales. En este caso, las funcionalidades extra asociadas a los relays de nivel L2 y L3 pueden ser importantes para proporcionar rápidamente un servicio adecuado en el área de cobertura de la zona de emergencia.
- Wireless Backhaul. El objetivo es proporcionar un enlace de *backhaul* de dos o más estaciones base en zonas rurales, sin necesidad de que sea punto de acceso al servicio para ningún UE. Este enlace sustituye al enlace fijo. En este caso el RS debe estar optimizado para proporcionar alta eficiencia espectral. En general, transmite con alta potencia. Para este tipo de uso parece más apropiado el empleo de relays L3.

A.4. Modos de aplicación en función del tipo de relay

Dependiendo de la capacidad de los usuarios de recibir la información de control directamente a través del relay o de si deben hacerlo directamente de la estación base, es decir, del conocimiento de los usuarios de la entidad a la que se enganchan para recibir servicio, se distinguen dos modos de funcionamiento:

- **Transparente:** en este modo de funcionamiento los usuarios no son conscientes de la entidad de la que reciben servicio y el hecho de que su transmisión sea soportada de forma

auxiliar por un RS no debe suponer ningún impacto sobre el modo de funcionamiento estándar de los mismos. Así deben necesariamente estar dentro del área de cobertura de la R_BS local y recibir toda la información de control de la misma. Los datos del usuario se transmitirán a través del relay para aprovechar las mejores condiciones de sustituir el enlace directo por el enlace *backhaul* y el *access*, pero ello será gestionado de modo totalmente transparente para los usuarios. Este modo de funcionamiento soporta únicamente *scheduling* centralizado y su aplicación fundamental es la de mejorar la capacidad dentro de la propia celda, ya que para la extensión de cobertura no es aplicable.

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. El relay dispone del mismo identificador de celda que la R_BS, lo que permite que el UE conmute la comunicación del RS a la R_BS sin necesidad de efectuar un *handover*. Todos los UEs y RSs dentro de la zona de cobertura de la R_BS están sincronizados con ésta y pueden obtener la información de control (sincronización, selección adaptativa de MCS, subportadoras y potencia, asignación de recursos en DL y UL) directamente de la R_BS, lo que reduce el *overhead* de señalización. Es posible aplicar técnicas de transmisión cooperativa 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.

- **No Transparente:** los usuarios que van a comunicarse a través de un nodo relay son conscientes de ello, y reconocen al mismo como a una propia estación base de la que van a recibir en el DL y a la que transmitirán en el UL la información de control pertinente, así como los paquetes de datos. Soporta tanto *scheduling* centralizado como distribuido, aunque parece más adecuado el *scheduling* distribuido ya que ofrece 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.

El coste puede ser alto pero permite un despliegue rápido de la red para ampliar la cobertura o incrementar la capacidad en una determinada zona. Se corresponde con un relay de nivel 2 o 3.

Asociado con los modos de funcionamiento explicados aparece la posible idea de que estaciones base y relays puedan trabajar de forma cooperativa en la comunicación o lo hagan por el contrario de manera independiente y aislada. Para ello habrá que tener en cuenta el tipo de relay y el modo de funcionamiento diseñado, pues en función de ello se presentan ciertas limitaciones en la posibilidad de cooperación.

- **Modo cooperativo:** el relay coopera con la R_BS, de manera que se mejora el *throughput* y los usuarios reciben la señal de ambas fuentes (Figura A.6). En este modo de funcionamiento cooperativo se requiere perfecta sincronización entre la R_BS y los RSs.

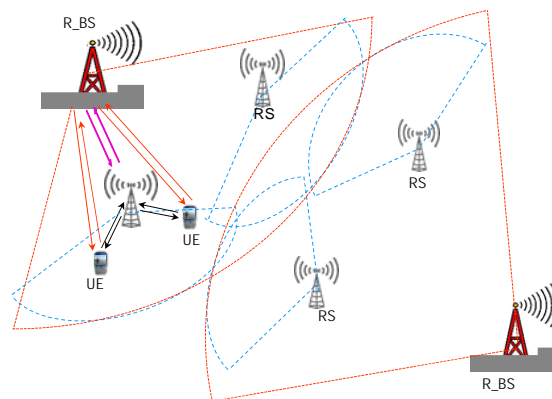


Figura A.6 . Área de cobertura en modo cooperativo, relays tipo II

El objetivo en el DL es que, en primera instancia, sea la estación base quien transmita toda la señalización, y los datos a los relays (que muy probablemente los recibirán de manera correcta gracias a las mejores condiciones del canal *backhaul*) y a los móviles. En caso de que exista una mala recepción en el UE del paquete, el móvil lo comunicará tanto al relay como a la estación base, y la retransmisión será efectuada por ambas entidades. Ya que las decisiones de *scheduling* se han tenido en cuenta en base a la información de canal del enlace *access*, el usuario recibirá en la segunda transmisión los datos con éxito en una probabilidad mucho mayor. También se puede plantear la posibilidad de que el relay ayude a la transmisión entre la estación base y el usuarios desde el principio, y no únicamente en el caso en que el primer intento de transmisión haya resultado fallido, es decir, una cooperación total.

Para el UL el planteamiento es similar pero a la inversa. El usuario transmite tanto al relay como a la estación base. En el mismo instante se ha de mandar el informe de correcta o incorrecta recepción por parte del relay y de la estación base (el relay manda confirmación de recepción correcta ACK-Acknowledgement a través del enlace $R_BS \leftrightarrow RS$ y la R_BS manda confirmación de recepción incorrecta NACK-Negative Acknowledgement al UE). El usuario al recibir NACK retransmitirá de nuevo hacia las dos entidades.

El modo de funcionamiento cooperativo puede ser implementado únicamente a nivel de celda para la mejora de capacidad ya que todos los usuarios han de estar bajo la cobertura de ambas entidades, y se asocia fundamentalmente a un modo de funcionamiento transparente en el que los receptores móviles recibirán la información de control de la estación base y los datos de una u otra entidad o de ambas simultáneamente dependiendo de la situación sin que ellos deban saber quién se la está proporcionando.

- **Modo no cooperativo:** el funcionamiento de los relays sirve para dar soporte a las transmisiones de los usuarios que no tendrían una buena comunicación directa con la estación base. Serán las únicas entidades que transmitan/reciban a/de sus usuarios, sin que la estación base en este caso se comunique con ellos (Figura A.7).

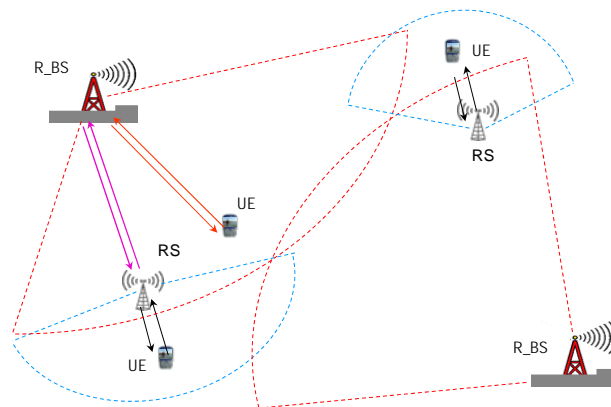


Figura A.7 .Área de cobertura en modo no cooperativo, relays tipo II

En el modo no cooperativo y cuando la cobertura de los relays se extiende más allá de los límites de la celda, el esquema de retransmisión se complica ya que los usuarios pueden estar fuera de la zona de alcance de las estaciones base y los relays deben ser quienes transmitan sus propios canales de control, por lo que en este caso no se soporta el diseño de un modo transparente.

Puede entenderse adicionalmente como modo no cooperativo la posibilidad de que en la propia celda los relays sirvan a sus usuarios, sin que éstos reciban de la estación base, en aplicaciones de mejorar el *throughput*, por lo que se soportaría un modo transparente siempre que los canales de control se reciban de la R_BS , o un modo de funcionamiento

no transparente cuando tanto la información de datos como la de control es exclusivamente función de los nodos relay.

En función de todas estas características y modos de aplicación se establecen para las nuevas tecnologías LTE dos grandes grupos de relays que recogen los aspectos descritos anteriormente (Tabla A.1.).

- **Relay Tipo1:** de cara al UE no existen diferencias respecto a la R_BS. Tiene su propio *Physical Cell ID* y puede transmitir sus propios canales de control, sincronización, símbolos de referencia, etc. El usuario recibirá información de *scheduling* y HARQ directamente del relay y mandará también al mismo directamente sus canales de control (SR-Scheduling Request, CQI-Channel Quality Indicator, ACK). Funciona a todos los efectos como una estación base para el usuario. Es en definitiva un relay de nivel 2 o 3 que opera en modo no transparente y no cooperativo al que se podrá dotar de autonomía suficiente como para gestionar sus propios usuarios.
- **Relay Tipo2:** se caracteriza porque no tiene una Physical Cell ID, por lo que no puede crear nuevas celdas. Es transparente para los UEs conectados a la R_BS, que no serán conscientes de la existencia de los mismos. Transmiten y reciben en la misma banda frecuencial que la R_BS por multiplexado en tiempo (TDM: Time Division Multiplex). Un usuario recibirá los canales de control únicamente de la R_BS y los datos PDSCH (Physical Downlink Shared CHannel) del relay.

Tipo Relay	Tipo 1	Tipo 2
Nivel	L2, L3	L2
Cell ID	Propio cell ID	No propio cell ID
Transparencia	No transparente al UE	Transparente al UE
Nueva celda	Si	No
Generación Canal Control	Genera sus propios canales de control y señalización para sus usuarios	No genera su propio canal pero decodifica la señal de la R_BS al UE
Cooperación	Inter celda	Intra celda
Aplicación principal	Extensión de cobertura	Aumento de la capacidad
Coste	Alto	Bajo

Tabla A.1. Clasificación de los diferentes tipos de relay

Anexo B:

Señalización en modo Relay

En este anexo se analizan las implicaciones derivadas de la inclusión de estaciones relay en la infraestructura de un sistema de comunicaciones móviles, en concreto aspectos relacionados con la señalización y estructura de trama MAC, en función del tipo de relay utilizado.

B.1. Estructura de trama MAC en modo Relay

Para el funcionamiento en modo relay, en el que se pretende gracias a estas entidades o bien aumentar la cobertura o bien mejorar la capacidad de la celda, habrá que tener en cuenta que se precisa nueva señalización que afectará a la estructura de la trama, y que dependerá del modo de funcionamiento (transparente, no transparente) y del tipo de *scheduling* implementado (centralizado, distribuido) [27]-[37].

Habrà además que distinguir el caso en el que el relay no es capaz de transmitir (Tx) y recibir (Rx) simultáneamente (*half-duplex*), del caso en que sí lo es (*full-duplex*). En la misma frecuencia no se permite la combinación de Tx y Rx debido a la alta interferencia que se produciría en la misma.

El primer aspecto a tener en cuenta es si existe una necesidad por parte de los relays de transmitir señalización a los usuarios conectados al mismo, o si la información de control es única y exclusivamente enviada por la estación base. Esto dependerá del modo de funcionamiento deseado, ya que si se trabaja en modo transparente los UEs no serán conscientes de la existencia de los relays y será la R_BS la encargada de mandar toda la información de control (asignación de recursos para UL y DL, ACKs/NACKs) tanto a los RSs como a los UEs, que deberán pertenecer obligatoriamente a la zona de cobertura de la misma, mientras que si el modo de trabajo es no transparente, los UEs conectados a un RS reconocen al mismo como una estación base y debe ser éste quien les envíe la señalización, mientras que la información de control que manda la R_BS únicamente irá destinada a los RSs y a los UEs conectados directamente a la misma (macro usuarios). Por otro lado se debe distinguir el tipo de *scheduling* que se va a implementar, pues si éste es centralizado, la R_BS será quien decida los recursos asignados a cada relay y también los recursos en los que van a recibir/transmitir cada uno de los UEs, mientras que si el *scheduling* es distribuido la R_BS le comunicará a cada uno de los relays los recursos de los que va a disponer y los usuarios a los que debe dar servicio, pero será el propio relay quien decida cómo gestionarlos.

Si se fija el objetivo de trabajar con un duplexado FDD entre el DL y UL (ambos enlaces operarán en diferente espectro frecuencial), se plantearán a continuación diferentes propuestas en cuanto a la señalización se refiere y teniendo en cuenta las posibilidades de multiplexación en tiempo o en frecuencia de las transmisiones y recepciones en el relay.

Además se considera un requisito funcional del modo relay en este estudio la compartición de las mismas bandas frecuenciales que las comunicaciones infraestructura estándar. Asumiendo estas premisas de partida, el esquema base de mapeado de los enlaces *backhaul* y acceso-relay sobre estas bandas frecuenciales es tal que el RS es visto por la R_BS como un UE más, y a su vez los UEs que cuelgan del RS ven a éste como a una estación base (Figura B.1). Es decir, se aplica un duplexado FDD del enlace ascendente y descendente tanto en el *backhaul* como en el enlace de acceso al relay, de tal forma que se utiliza la banda del UL en la comunicación entre UE macro y R_BS, UE relay a RS y RS a R_BS, mientras que, la banda del DL se utiliza en el enlace R_BS a UE macro, R_BS a RS y RS a UE relay.

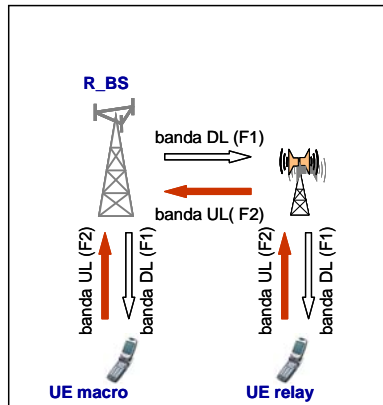
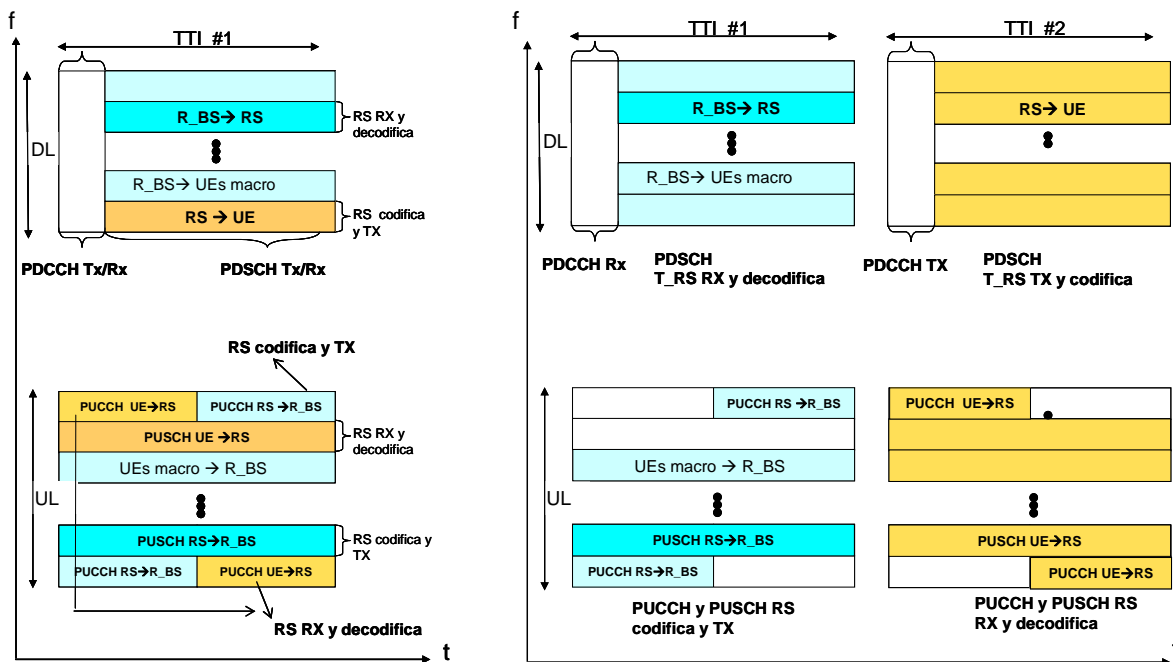


Figura B.1. Mapeado frecuencial de las transmisiones en el backhaul y enlace de acceso al relay

Partiendo de esta configuración, un aspecto relevante es cómo se reparten los recursos frecuenciales entre los distintos enlaces. Como norma general, en cada subtrama, los recursos (RB) del DL (o alternativamente del UL) se reparten entre las comunicaciones macro (dirigidas a los UE macro) y las comunicaciones R_BS a RS y/o alternativamente entre las primeras y las comunicaciones entre el RS y los UE relay.

En la Figura B.2 se ilustran dos estructuras de trama para multiplexar el tráfico y señalización generada entre R_BS y RS (o UE) y entre RS y UE. 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 y Rx para cada una de las bandas o no. Aun 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 (TD relay o multiplexado en tiempo) o compartir los recursos frecuenciales (ancho de banda) en un mismo instante temporal (FD relay o multiplexado en frecuencia). En el caso de multiplexado temporal (TD), la transmisión del RS en cada uno de los enlaces (*backhaul* y acceso al relay) puede ser a su vez *full-duplex* o *half-duplex*. En el primer caso, el RS transmite y recibe hacia/desde la R_BS en una subtrama, y luego transmite y recibe hacia/desde el UE en configuración *full-duplex* en el enlace *backhaul* o en *half-duplex* en la subtrama siguiente (los enlaces *backhaul* y acceso al relay están duplexado en tiempo). En el segundo caso, el RS recibe datos y señalización de la R_BS y del UE en una subtrama, y luego transmite a la R_BS y al UE en la siguiente subtrama.



a) Multiplexado FD
b) Multiplexado TD. Enlaces "backhaul" y "acceso relay" full duplex
Figura B.2. Opciones de mapeo frecuencial de las transmisiones en el backhaul para duplexado FDD

Una cuestión fundamental a tener en cuenta pues en el estudio de la señalización necesaria y el impacto sobre la estructura de trama MAC, es si el relay puede transmitir y recibir información simultáneamente en la misma banda frecuencial. En general se asume que no es posible. Por tanto, será necesario definir la subtrama relay y su ajuste a la trama estándar de acuerdo con este requisito.

Limitando el estudio al caso de duplexado FDD del DL y UL, se pueden definir varias estructuras de trama para multiplexar el tráfico y señalización generada entre R_BS y RS o UE y entre RS y UEs.

Como conceptos generales, se puede asumir que las transmisiones $R_BS \rightarrow RS$ y $R_BS \rightarrow UE$ comparten los mismos recursos en el DL. Del mismo modo las transmisiones $UE \rightarrow RS$ y las transmisiones $UE \rightarrow R_BS$ los comparten en el UL. Algunas cuestiones a tener en cuenta serán:

- Reparto adaptativo de recursos. Es posible en ambos esquemas. En el caso del modo FD, se haría vía asignación dinámica de recursos frecuenciales. La adaptación dinámica del ancho de banda espectral utilizado es compleja.
- Medidas de calidad. En el modo FD, cualquier UE puede obtener simultáneamente medidas de la calidad del canal experimentado con R_BS o RS y seleccionar de forma adaptativa con quién establece la comunicación. En el caso de TD no es posible.
- Necesidad de periodos de guarda. Para el modo TD se requiere un periodo de guarda necesario para la transición del relay entre los modos Rx-Tx. En el caso del modo FD se requiere una banda de guarda para evitar las interferencias entre el transmisor y el receptor que forman parte del propio relay.

En primer lugar se identifican claramente los requisitos de señalización existentes:

En el enlace $R_BS \leftrightarrow RS$ (backhaul).

En el DL:

- Canales de datos dirigidos a los UEs, es decir, recursos que la R_BS cede al RS para dar servicio a los UEs conectados al mismo.

- Señalización L1/L2 tipo ACKs/NACKs del enlace backhaul ascendente.
- Identidad de los usuarios conectados al relay.
- Indicaciones de *scheduling*. En este caso, depende del modo de *scheduling* utilizado, ya que si el *scheduling* es centralizado la R_BS toma las decisiones de asignación sin que el RS posea capacidad de decisión, debiendo indicar tanto qué RB es asignado a cada UE como el esquema de modulación y codificación MCS empleado, y el RS se limitará sólo a transmitir/recibir en los recursos tal y como se le ordena, mientras que si el *scheduling* es distribuido, la R_BS le asignará al RS los recursos anteriormente citados (canales de datos) pero será éste quien decida cómo distribuirlos entre los usuarios conectados al mismo, por lo que estas asignaciones no formarán parte de la señalización requerida.

En el UL:

- Señalización de nivel L1/L2. Por ejemplo, ACK/NACKs del enlace descendente, CQIs (tanto entre R_BS y RS y entre RS y UE para que sea la estación base quien decida el modo de comunicación al que van a someterse los usuarios) o peticiones de *scheduling* por parte de los UEs en el caso de *scheduling* centralizado.

En el enlace RS \Leftrightarrow UE (relay access)

En el DL:

- Señalización L1/L2 tipo ACKs/NACKs del enlace relay *access* ascendente.
- Recursos asignados a los usuarios conectados por el relay a cada uno de los usuarios para que éstos puedan recibir/transmitir datos en el DL/UL.

En el UL:

- Señalización de nivel L1/L2. Por ejemplo, ACK/NACKs del enlace descendente, CQIs (entre el UE y el RS), peticiones de *scheduling* de los UEs tanto en el caso de *scheduling* centralizado como distribuido.
- En el enlace directo entre R_BS \Leftrightarrow UE la información de control es la misma que en el modo de funcionamiento infraestructura, es decir, la señalización L1/L2 tipo ACKs/NACKs del enlace *access* ascendente y asignación de recursos tanto para DL/UL en el caso del enlace DL, y señalización referente al nivel L1/L2, como por ejemplo, ACK/NACKs del enlace descendente, CQIs (entre el UE y el RS) y peticiones de *scheduling* para el caso del enlace UL.

Considerando los requisitos de señalización habrá que tener en cuenta qué esquema de asignación de recursos se va a aplicar.

En el enlace R_BS \Leftrightarrow RS (backhaul).

- Reserva semiestática. Se puede asumir que estadísticamente la cantidad de espacio que se va a necesitar para soportar las comunicaciones con los diferentes UEs que cuelgan de un RS es bastante estable, tanto como para que se renegocie de forma semiestática entre la R_BS y el RS.
- Reserva dinámica. Desde el punto de vista de la R_BS, los recursos necesarios para el DL son conocidos en base a la cantidad de tráfico que se precisa, y la MCS se puede ajustar en función de la calidad del canal entre la R_BS y el RS, el tipo de tráfico o de calidad de servicio demandada. Desde el punto de vista de la estación base, se indicaría en qué zona se mapean los recursos DL dirigidos hacia el RS y en esa zona es preciso definir una nueva subestructura de trama conteniendo las indicaciones de *scheduling* específicas dirigidas a los UEs (en el caso de que el modo sea de *scheduling* centralizado no transparente). Dentro de esta nueva subestructura la señalización y los datos se pueden multiplexar en modo FDD o TDD.

Como se deduce de los requisitos anteriores, es necesaria la existencia de una zona de control entre la estación base y el relay tanto para el modo transparente como no transparente y tanto para el caso de *scheduling* centralizado como distribuido. Además será preciso que la R_BS comunique al RS los datos que éste debe retransmitir a los usuarios que cuelgan de él.

La comunicación entre la estación base y el relay constará de información de control e información de datos, que podrán ser multiplexadas atendiendo a varios esquemas: TDM (Time Division Multiplex), FDM (Frequency Division Multiplex), TDM/FDM (Figura B.3, Figura B.4).

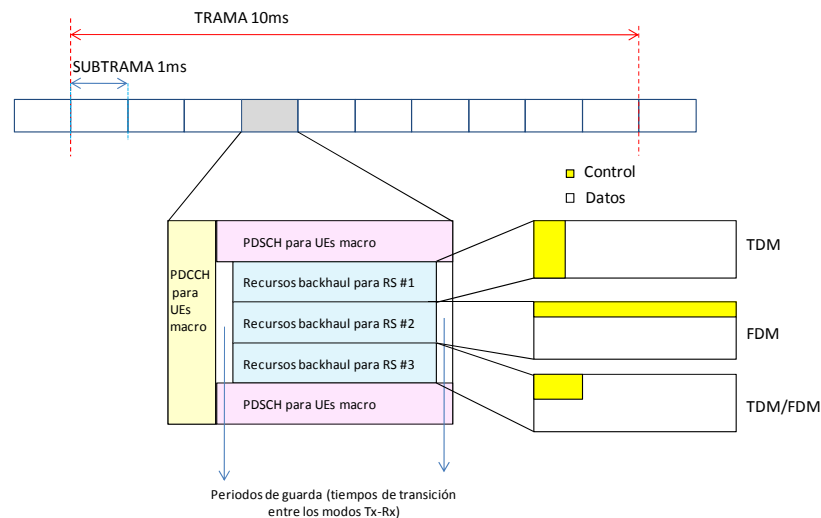


Figura B.3. Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay DL

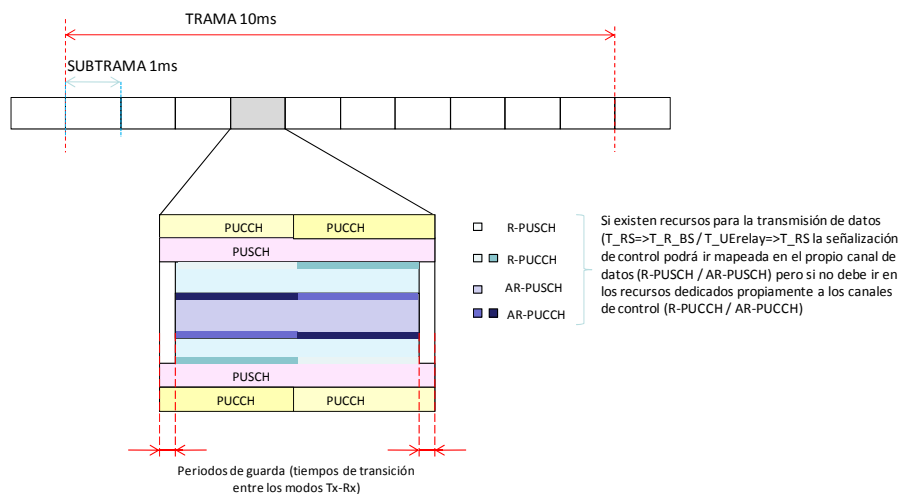


Figura B.4. Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay UL

Para el DL, en el enlace directo, la información de control seguirá recibiendo la misma nomenclatura que en el modo infraestructura (PDCCH, PHICH-*Physical Channel*, PCFICH), así como la de datos (PDSCH); en el enlace entre la estación base y el relay (enlace *backhaul*) la nomenclatura será la misma precedida de R (R-PDCCH, R-PHICH, R-PCFICH, R-PDSCH) y en el enlace entre el relay y los usuarios que cuelgan del mismo (relay *access*) la nomenclatura será AR seguido del nombre del canal en cuestión (AR-PDCCH, AR-PHICH, AR-PCFICH, AR-PDSCH). Análogamente ocurre lo mismo en el caso del UL, en el que en el enlace directo el canal de control es el PUCCH-*Physical Uplink Control Channel* y el de datos el PUSCH-*Physical Uplink Control Channel*, en el enlace *backhaul* se denominan R-PUCCH y R-PUSCH respectivamente y en el enlace relay *access* AR-PUCCH y AR-PUSCH (Figura B.5).

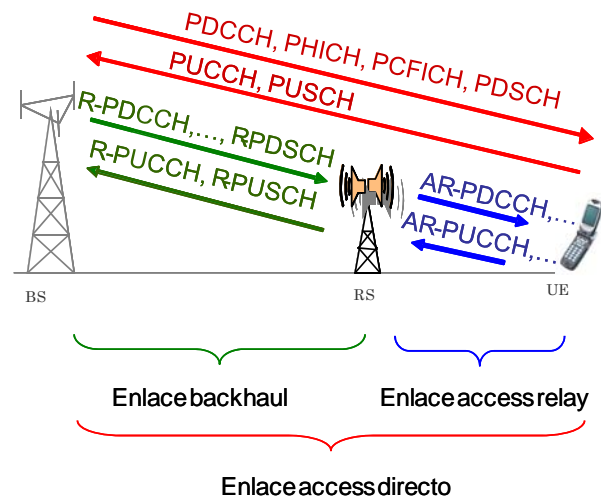


Figura B.5. Nomenclatura de los canales de los diferentes enlaces en modo relay

El multiplexado entre la zona de control y datos que el relay debe recibir puede hacerse de varias maneras:

- Multiplexado FDM. Este tipo de estructura facilita el mapeado de los canales de señalización de *scheduling* (R-PDCCH). Por el contrario, retrasa la decodificación de la información, ya que se precisa recibir todos los datos de R_PDCCH antes de poder decodificar los datos y reencaminarlos hacia el UE (Figura B.6).

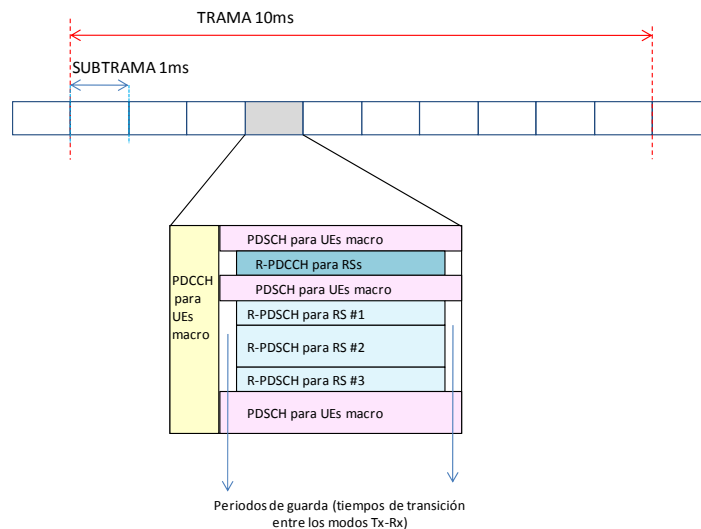


Figura B.6. Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay FDM DL

- Multiplexado TDM: Con este modo de multiplexado entre control y datos se reduce la latencia anteriormente citada. En general se requiere señalar de forma semi-estática la cantidad de recursos que van a asignarse a los canales de señalización R-PDCCH y al canal R-PDSCH. (datos). Esto resta flexibilidad al uso de los recursos y puede suponer una disminución de la eficiencia (Figura B.7).

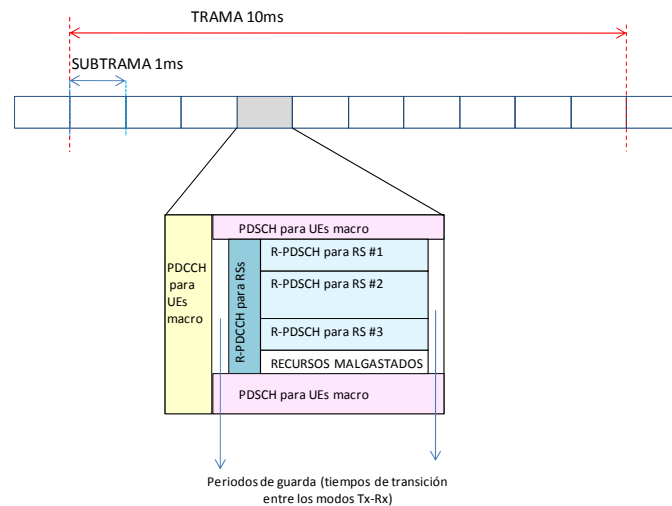


Figura B.7. Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay TDM DL

- Para tener un *scheduling* más flexible se puede pensar en una asignación dinámica en la que todo el ancho de banda es subdividido en múltiples particiones compuestas por un grupo de RBs. Una partición puede ser utilizada o bien para la transmisión de datos de la R_BS a los macro usuarios (conectados directamente a la misma) o para transmisiones hacia el relay (en este caso control y datos hacia el RS van multiplexados en tiempo). Ajustando el número de particiones usadas para las transmisiones *backhaul*, la R_BS puede asignar zonas para los relays más dinámicamente, que serán informados de si una partición es usada para los macro UEs o para zona relay mediante señalización de la R_BS (Figura B.8).

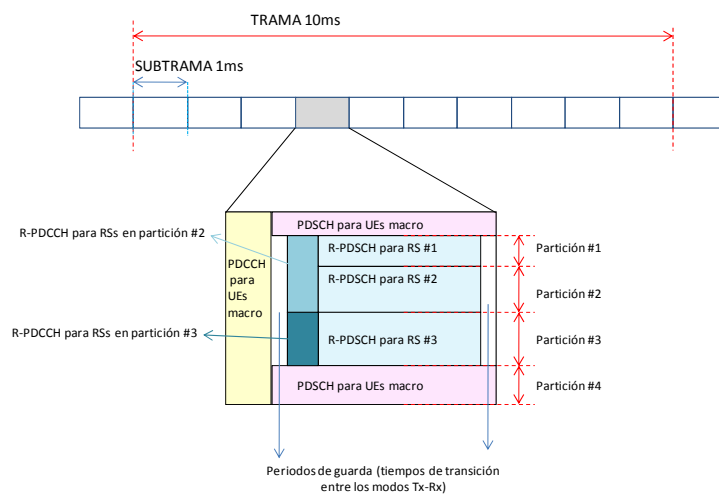


Figura B.8. Zona relay dinámica mediante particiones (R-PDCCH y datos backhaul TDM) DL

- Multiplexado FDM/TDM: En este esquema existen dos zonas de DL backhaul, la "*Primary Backhaul Resource*" (PBR) y la "*Secondary Backhaul Resource*" (SBR). PBR es una región definida para cada RS y consta de una pequeña cantidad de recursos que seleccionará para cada relay la mejor banda frecuencial y que puede ser modificada por señalización de las capas superiores, y SBR es una zona dinámicamente asignada que depende de la cantidad de tráfico (no cubierta por PBR), y cuya información de *scheduling* es señalizada al relay a través de un canal de control CCH (Control CHannel) específico multiplexado en tiempo con PBR (Figura B.9).

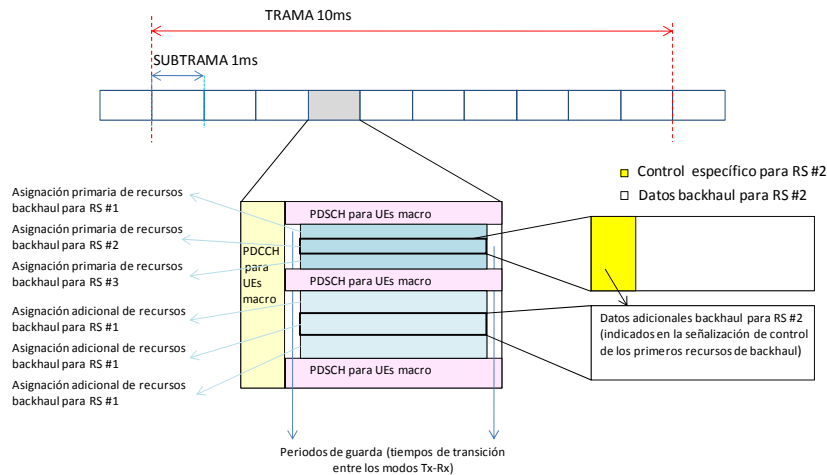


Figura B.9. Mapeado de datos y control para la comunicación en modo relay FDM/TDM DL

B.1.1. Señalización para el modo transparente (Tipo 2)

Una vez visto, en líneas generales, el tipo de señalización que se requiere añadir debido a la existencia de los relays, se particulariza ahora para el modo transparente la estructura de trama propuesta, distinguiendo la posibilidad de que el relay no sea capaz de transmitir y recibir simultáneamente (consta de una única entidad radio), por lo que será necesario multiplexar en tiempo los datos transmitidos entre los enlaces $R_BS \leftrightarrow RS$, $RS \leftrightarrow UE$ y $R_BS \leftrightarrow UE$, del caso en que sí lo es, en el que será posible un multiplexado en frecuencia de los datos transmitidos entre los distintos enlaces anteriores.

En el caso del DL, los relays se dedican exclusivamente a escuchar de la R_BS qué UEs cuelgan del mismo, qué datos deben ser retransmitidos a los mismos y en qué RB y con qué MCS se deben enviar. En el modo de funcionamiento transparente los RSs no han de mandar ninguna información de control, pero sí han de transmitir datos sus usuarios, por lo que se han de organizar las fases de recepción (los RSs escuchan la señalización destinada a ellos proveniente de la estación base) y transmisión (reenvío de datos a sus UEs) adecuadamente dependiendo de las capacidades de los relays.

En el caso del UL los UEs transmitirán los datos sin ningún cambio respecto al modo infraestructura ya que los usuarios no son conscientes de la existencia de los relays, pero éstos deberán recibirlos y retransmitirlos a la estación base para mejorar la calidad del enlace.

Relay con una radio (half-duplex)

En este caso el RS no es capaz de operar en modo Tx y Rx simultáneamente, y además se debe respetar un cierto tiempo de transición entre ambos modos (generalmente 1símbolo OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplex*). Por ello es necesario multiplexar en tiempo los datos que el relay ha de recibir (de la R_BS en el DL y de los UEs en el UL) con los que ha de transmitir (hacia los UEs en el DL y hacia la R_BS en el UL), es decir, los datos del enlace *backhaul* con los del relay *access*.

Teniendo en cuenta que el número de relays va a ser mucho menor que el número de usuarios, la información de control que éstos necesiten recibir será más escasa que la información de control que la estación base ha de mandar en todos los TTIs (subtramas) a los usuarios. De aquí surge el concepto de la subtrama "MBSFN" (*Multicast Broadcast Single Frequency Network*) o subtrama "blanca" o "vacía" definida por el 3GPP, subtramas que serán implementadas cada cierta periodicidad, y que son aprovechadas por los relays para recibir todos los datos necesarios de la estación base.

Al tratarse del modo transparente el relay puede escuchar la información de control de la R_BS como cualquier otro UE cuando opere en modo Rx, subtramas en las que aprovechará para escuchar

los datos que le pasa la estación base, mientras que deberá mandar datos a los UEs que cuelgan de él cuando esté en modo Tx en aquellas subtramas en las que el RS no requiera escuchar información de control. En las subtramas en las que los relays escuchan a la estación base (MBSFN) sus usuarios relay no van a poder recibir ningún dato (Figura B.10).

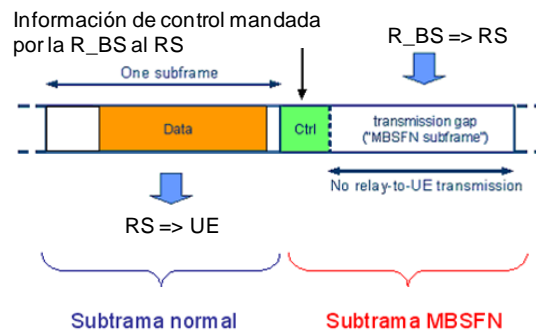


Figura B.10. Comunicación RS->UE usando subtramas normales (izquierda) y comunicación R_BS->RS usando subtramas blanca (derecha) multiplexadas TDM

La estructura interna de cada una de las subtramas anteriores se representa a continuación en los siguientes gráficos (Figura B.11, Figura B.12):

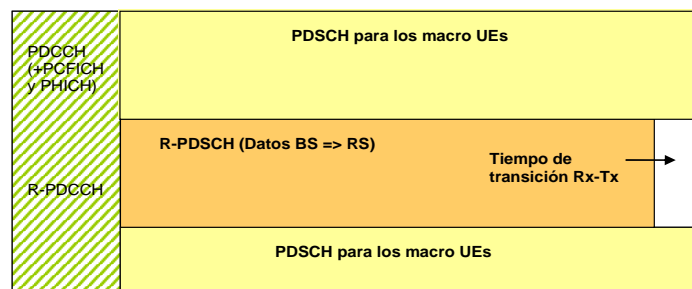


Figura B.11. Estructura de la subtrama blanca en la que la información de control R-PDCCH va mapeada en los mismos recursos que la información de control a los macro UEs (primeros símbolos OFDM).

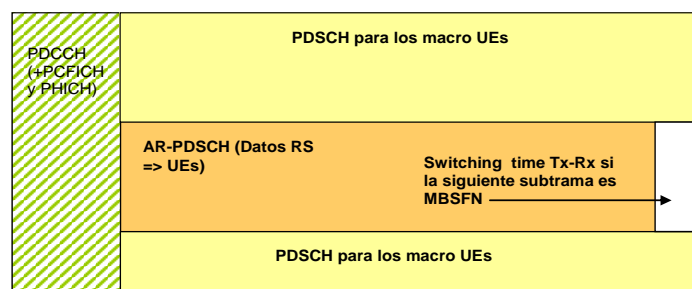


Figura B.12. Estructura de la subtrama en la que el RS puede mandar los datos a sus UEs ya que no requiere recibir señalización

Con esta misma estructura se puede implementar una variante en la que la información de control dedicada al relay (R-PDCCH) va mapeada en recursos independientes a los dedicados para la señalización de los usuarios, señalizados mediante las capas superiores para que el RS sepa dónde leerlos. El inconveniente de esta variante es que el relay está inactivo durante un periodo de tiempo (primeros símbolos dedicados a la información de control R_BS=>UEs en los que el RS no recibe nada), por lo que para el modo transparente parece más adecuada la idea de mapear esta información de control hacia los relays en los primeros símbolos OFDM y que éstos la decodifiquen exactamente igual a como lo hacen los usuarios.

La Figura B.13 representa la estructura de trama MBSFN o blanca en la que el relay recibe información de la estación base, tanto la señalización como los datos que posteriormente deberá

retransmitir a los UEs que cuelgan de él. El conjunto de tramas que no son blancas se dedican al envío de información entre el RS y sus UEs, siendo necesario un tiempo de transición entre los modos Tx y Rx únicamente cuando la siguiente subtrama sea de nuevo blanca. En ambos tipos de subtramas se dedican recursos para los macro UEs.

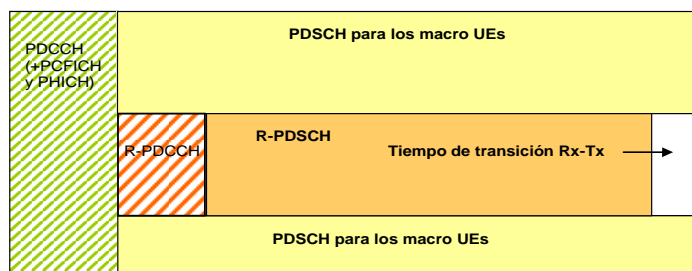


Figura B.13. Estructura de la subtrama blanca en la que la información de control semi-estática R-PDCCH va mapeada en distintos recursos que la información de control a los macro UEs

La señalización que debe mandar la estación base a cada uno de los relays puede planificarse de modo semi-estático, de manera que la información de control se mapea en las diferentes subtramas en los mismos recursos, o de manera dinámica, donde el número de recursos que transportan la información de control varía dependiendo de las condiciones de la red en cada instante, consiguiendo con ello mejor adaptación y flexibilidad a costa de aumentar la complejidad en la señalización, pues en este caso es necesario añadir un canal de control (R-PCFICH) que indique el tamaño del nuevo canal R_PDCCH (Figura B.14).

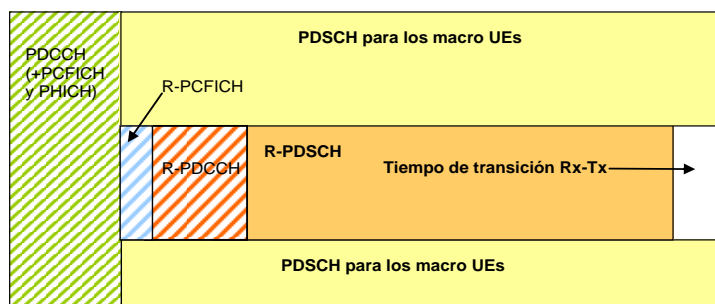


Figura B.14. Estructura de la subtrama blanca en la que la información de control dinámica R-PDCCH va mapeada en distintos recursos que la información de control a los macro UEs

La estructura de las tramas para la transmisión de los datos entre el usuario y el relay y estación base, según corresponda, así como para la transmisión entre el relay y la estación base, para el enlace ascendente, se representan en la Figura B.15 y Figura B.16. Habrá que tener en cuenta de nuevo el símbolo necesario para la transición de modo del relay.

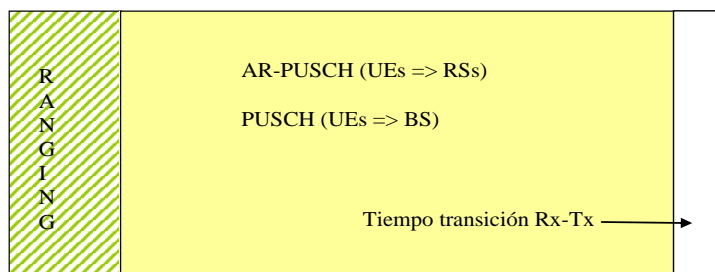


Figura B.15. Estructura de la subtrama UE => RS para relay half-duplex

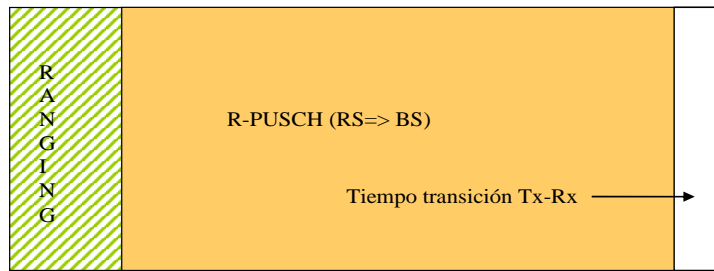


Figura B.16. Estructura de la subtrama RS => R_BS para relay half-duplex

Relay con varias radios (full-duplex)

En este caso los relays sí son capaces de operar en modo Tx y en modo Rx simultáneamente debido a la existencia de dos radios, una de ellas dedicada a transmitir y la otra a recibir. Gracias a ello, a parte de la estructura anterior, puede pensarse en un mapeado en frecuencia de los datos que deben transmitirse en los distintos enlaces.

En este caso ya no se requiere el tiempo de guarda entre la transición entre Tx \Leftrightarrow Rx, ya que cada una de las radios trabaja siempre en el mismo modo.

La estructura de la trama queda representada en la Figura B.17 y Figura B.18. Será conveniente que las zonas en las que el relay recibe (R-PDSCH) y transmite (AR-PDSCH) simultáneamente no sean consecutivas en frecuencia para intentar minimizar la interferencia en la zona extrema de la banda.

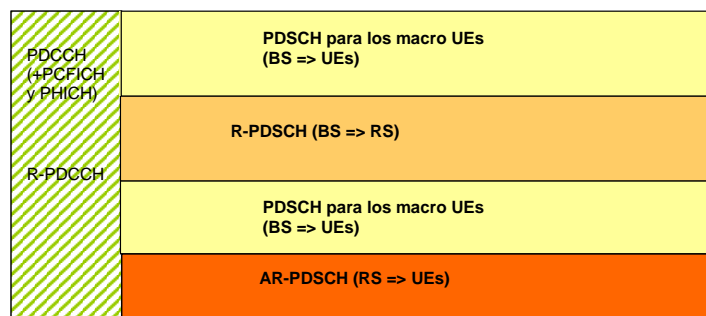


Figura B.17. Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control conjunta a la de los usuarios

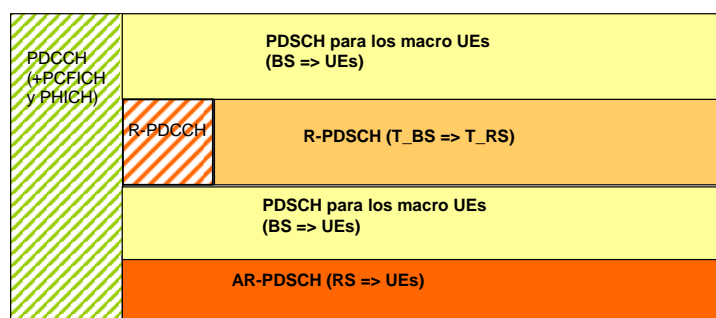


Figura B.18. Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control a parte de la de los usuarios

Como se observa la señalización dedicada al relay se puede mapear en una zona independiente a la zona dedicada a la señalización de los macro UEs o puede incluirse en la zona común dedicada a los mismos.

Igual que en el caso del relay con una sola radio, si la señalización requiere más dinamismo y el canal de control R-PDCCH es variable, se requerirá la existencia de un nuevo canal de control adicional R-PCFICH que indique el tamaño del anterior.

Como es lógico los datos que son enviados del relay a sus usuarios sufren cierto retraso (al menos 1TTI, dependiendo del retardo introducido por el relay) con respecto a los que envía la estación base directamente a las entidades que dependen de ella.

La estructura de trama para el enlace ascendente se representa en la Figura B.19. De manera análoga al DL, los datos que el relay transmite a la estación base sufrirán cierto retardo (al menos 1TTI, dependiendo de las condiciones del relay) con respecto a los que transmiten los usuarios a los RSs o a la R_BS directamente.

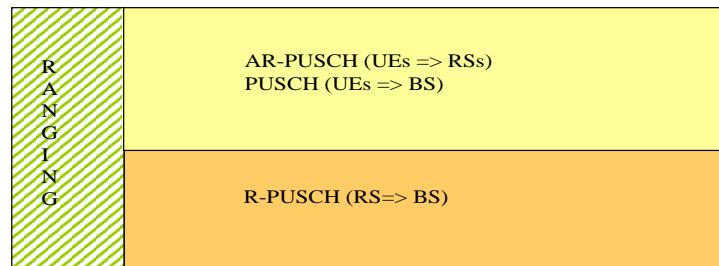


Figura B.19. Estructura de la subtrama UL para relay full-dúplex

B.1.2. Señalización para el modo no transparente (Tipo 1)

En este caso, la diferencia respecto al anterior, es que los UEs son conscientes de la existencia de los relays y los reconocen, en el caso en que dependan de ellos, como a sus propias estaciones base. La información de control de los usuarios que cuelgan de un relay es transmitida a los mismos por sus RSs, por lo que ya no es condición indispensable que los usuarios pertenezcan a la zona de cobertura de la estación base.

A nivel funcional, el RS puede ser un relay de nivel L2 o L3. Como premisa de partida se le 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*. Así, los procedimientos de nivel MAC, monitorización del canal y la temporización de los procesos HARQ estarán condicionados por el tipo de *scheduling*: centralizado en la R_BS o distribuido en el RS.

En líneas generales, se asume que el escenario de aplicación óptimo es la extensión de cobertura, pero aunque los enlaces R_BS<->RS y RS<->UE pueden ser de calidad comparable al de una comunicación R_BS<->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 otras estaciones base, de relays de la propia celda o de celdas adyacentes. A parte de poder ser utilizados para mejorar el *throughput* en la propia celda pueden servir para extender la cobertura. Por tanto, es razonable pensar en escenarios en los que el UE puede estar bajo la cobertura del relay pero no de la estación base. Esta peculiaridad debe tenerse en cuenta a la hora de considerar la posible reutilización de recursos frecuenciales en el *backhaul* y en el enlace de acceso al relay. Como implicaciones más relevantes de este modo de funcionamiento podemos identificar:

- El UE está conectado a la R_BS o al RS, pero no a ambos simultáneamente. Esto imposibilita la definición de esquemas de transmisión cooperativa entre R_BS y RS o entre RSs.
- El RS puede reutilizar de forma independiente los mismos recursos que la R_BS, aunque es preciso asegurar que el nivel de interferencia se encuentra por debajo de los umbrales admisibles. Para ello será necesaria la coordinación entre RS y R_BS.

- El relay incluye señalización de control HARQ (ACK/NACK), lo que implica que el HARQ se aplica a cada salto.
- Desde el punto de vista de señalización, independientemente del tipo de *scheduling* aplicado o del modo de multiplexado elegido para el enlace *backhaul* y de acceso al relay, 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. Aunque será preciso hacer algunas matizaciones, se requiere:
 - En el enlace R_BS \Leftrightarrow RS (*backhaul*). Canales de datos para mapear el tráfico recibido de o dirigido a los UEs que cuelgan del RS. Dichos canales de datos se pueden multiplexar dentro de la misma subtrama con canales de datos dirigidos a UE macro.
 - En el DL, señalización de control asociada al envío de ACK/NACKs 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 centralizado, la R_BS toma las decisiones de asignación sin que el RS posea capacidad de decisión, debiendo indicar tanto qué RB es asignado a cada UE en enlace RS \Leftrightarrow UE, así como el esquema de modulación y codificación MCS empleado, y el RS se limitará sólo a reproducir dicho *scheduling*, transmitiendo y recibiendo en los recursos tal y como se le ordena. 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.
 - En el UL, señalización de nivel L1/L2. Por ejemplo, ACK/NACKs del enlace descendente, CQIs relativos al estado del canal, tanto entre R_BS y RS como entre RS y UE (en el caso de considerar *scheduling* centralizado), peticiones de *scheduling* (para la transmisión en el *backhaul* o, en su caso, para el enlace de acceso al relay).
 - En el enlace RS \Leftrightarrow UE (relay *access*). Además de canales de datos, en el DL, señalización L1/L2 tipo ACKs/NACKs del enlace relay *access* ascendente, indicaciones de *scheduling* para el DL y UL. En el UL, señalización de nivel L1/L2. Por ejemplo, ACK/NACKs del enlace descendente, CQIs (entre el UE y el RS), peticiones de *scheduling* de los UEs tanto en el caso de *scheduling* centralizado como distribuido.
- 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, con respecto a la definida para las comunicaciones estándar.

De nuevo será necesario distinguir, para la definición de la estructura interna de la trama, el caso en que el relay posee una o varias entidades radio, analizando los casos por separado. Así pues en el modo no transparente, a diferencia del caso anterior, el relay debe siempre transmitir señalización a sus usuarios, por lo que la información de control ha de estar organizada de manera que todas las entidades reciban la que les corresponde. Si en los mismos símbolos temporales tanto la estación base como los relays pretenden mandar control a sus usuarios, el relay no podrá escuchar la señalización que se destina a él, por lo que la estructura en la que se recibía señalización como un usuario más ya no es válida. Mientras los relays están transmitiendo su información de control no están pudiendo escuchar la de la R_BS, por lo que se proponen dos alternativas:

- Desplazar las subtramas de la R_BS y RS que coincide con el tiempo que le cuesta al relay transmitir su información de control y pasar a modo recepción (se consideran 3 símbolos OFDM, este es el caso de transmisión asincrónica). Como ventajas se presenta el hecho de que no es necesario diseñar nuevas regiones de control mapeadas en recursos separados, y como

inconvenientes el hecho de que el relay o bien tendrá inutilizados alguno de sus símbolos o bien deberá ignorar alguno de los últimos símbolos OFDM de los UEs (Figura B.20).

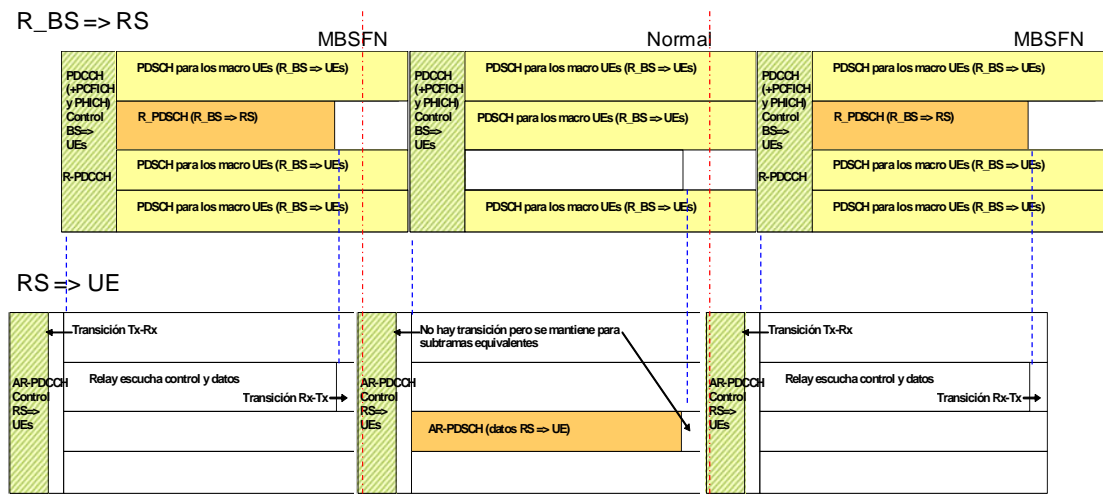


Figura B.20. Subtramas del enlace backhaul y access decaladas temporalmente

- Diseñar nuevos canales de control para la señalización referente al relay dentro del área de datos (transmisión sincrónica). Como ventajas se obtiene el hecho de que R_BS y RS son sincrónicos y como desventajas la necesidad de diseñar canales independientes para la nueva señalización, y como consecuencia restricciones adicionales en la asignación de recursos. Esta opción parece más adecuada (Figura B.21).

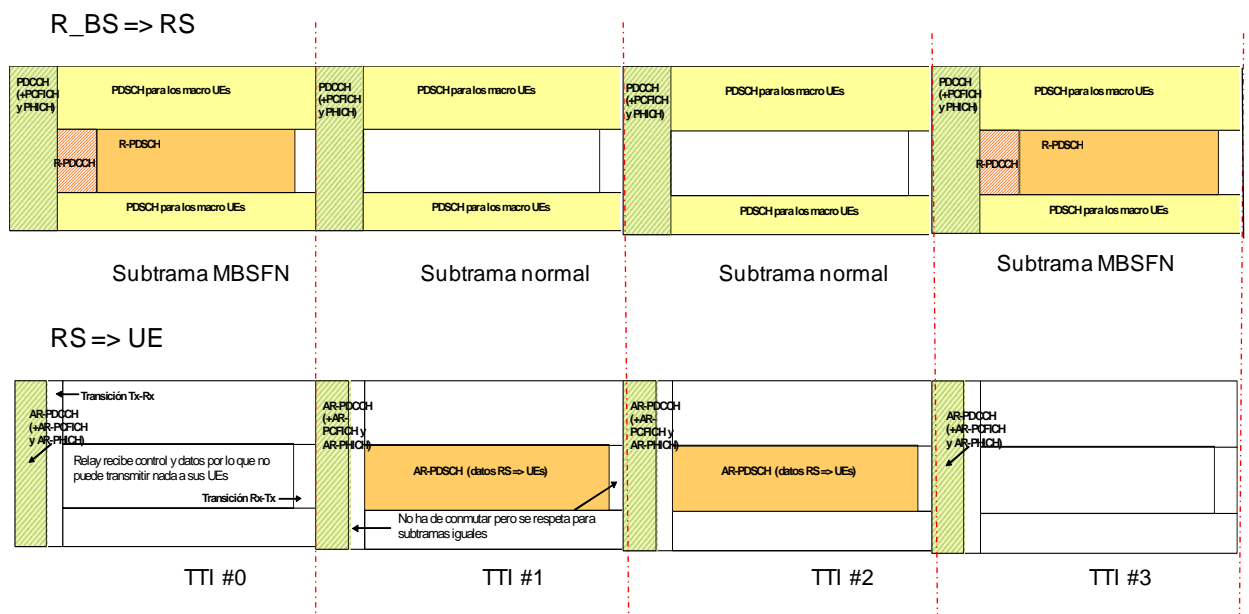


Figura B.21. Subtramas del enlace backhaul y access con recursos específicos para la señalización $R_BS \Rightarrow RS$

Relay con una radio (half-duplex)

El RS no es capaz de operar en modo Tx y Rx simultáneamente, y debe respetarse el citado anteriormente tiempo de guarda para la transición entre ambos modos. Será necesario por ello multiplexar en tiempo los datos que el relay ha de recibir (de la R_BS en el DL y de los UEs en el UL) con los que ha de transmitir (hacia los UEs en el DL y hacia la R_BS en el UL). Además en este caso hay que tener en cuenta que la información de control enviada por las estaciones base a los macro UEs no puede compartir recursos con la enviada por los relays, ya que no se soporta el doble modo de operación.

En el modo de funcionamiento no transparente, la información de control es enviada de la estación base a los macro UEs y de los relays a los usuarios que cuelgan de los ellos en los mismos símbolos y en todo el rango frecuencial, por lo que tanto la situación en la red de las diferentes entidades relays así como los usuarios a los que van a dar servicio, ha de estar planificado coherentemente para evitar el efecto de la interferencia que puede suponer recibir señales no deseadas en las mismas portadoras.

La estructura interna de las subtramas blancas, en la que el relay recibe información de control de la estación base, y del resto de subtramas en las que los relays envían datos a sus usuarios, que deberán ir multiplexadas en tiempo, se muestran a continuación en los siguientes gráficos (Figura B.22, Figura B.23, Figura B.24):

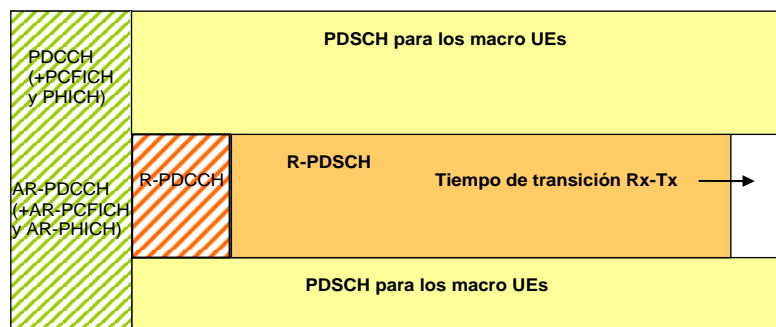


Figura B.22. Estructura de la subtrama blanca con información de control semi-estática R-PDCCH

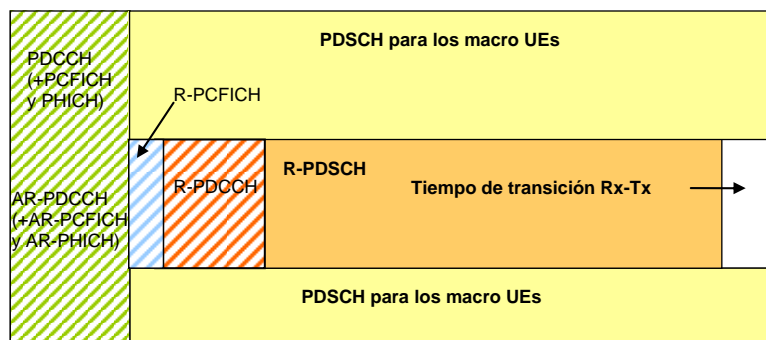


Figura B.23. Estructura de la subtrama blanca con información de control dinámica R-PDCCH

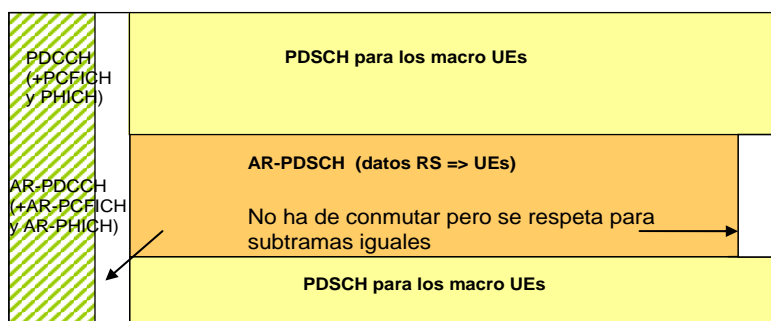


Figura B.24. Estructura de la subtrama en la que el RS no recibe información de control y puede mandar los datos a sus UEs

En el tiempo de duración de la información de control $R_{BS} \Rightarrow UEs$ (3 símbolos OFDM), los RSs han de ser capaces de mandar la señalización $RS \Rightarrow UEs$ (2 símbolos OFDM) y cambiar de modo Tx-Rx (1 símbolo OFDM) en el caso en que sea necesario.

Relay con varias radios (full-duplex)

En este caso los relays sí son capaces de operar en modo Tx y en modo Rx simultáneamente debido a la existencia de dos radios, y gracias a ello se puede implementar una estructura de trama con un mapeado en frecuencia de los datos que deben transmitirse en los distintos enlaces. En este caso ya no se requiere el tiempo de guarda entre la transición entre Tx \leftrightarrow Rx.

El punto fundamental a tener en cuenta en la estructura de trama que se va a presentar es la zona en la que se mapea la información de control R-PDCCH sobre la trama genérica y el modo en que se comunica al RS.

La información de control del relay en el DL (R-DCI, *Relay Downlink Control Information*), puede ser transmitida en el centro de la banda para obtener ventajas como el hecho de que el relay la pueda recibir aunque éste tenga un ancho de banda de operación menor al de la R_BS. No obstante, la posición puede ser arbitraria. La zona relay se mapea dentro de un número entero de RBs del PDSCH. En lo referente al tamaño del área R-DCI se pueden contemplar de nuevo las dos alternativas citadas anteriormente en función a si la planificación de la señalización se realiza de manera semi-estática o dinámica:

- Tamaño fijo. Alternativamente, se puede fijar un número fijo de símbolos OFDM para la zona de control R-DCI de manera que no se hace necesario el uso del canal R-PCFICH. En este caso, el número de símbolos se preconfigurará mediante señalización de niveles superiores (Figura B.25).

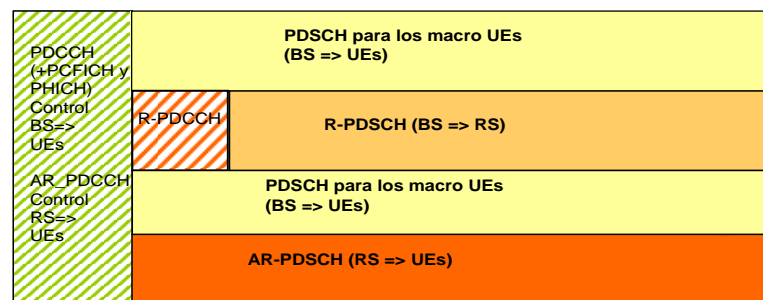


Figura B.25. Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control semi-estática

- Tamaño dinámico. Al igual que en la estructura de trama general, el número de símbolos utilizados para transmitir la información de control del relay en el downlink puede ser indicado por el canal de indicador del formato de control (R-PCFICH) igual que el PCFICH puede indicar los recursos requeridos para el PDCCH. El PCFICH debería estar mapeado en el primero de los símbolos de la zona de control pero ensanchado en frecuencia para obtener ganancia por diversidad (Figura B.26).

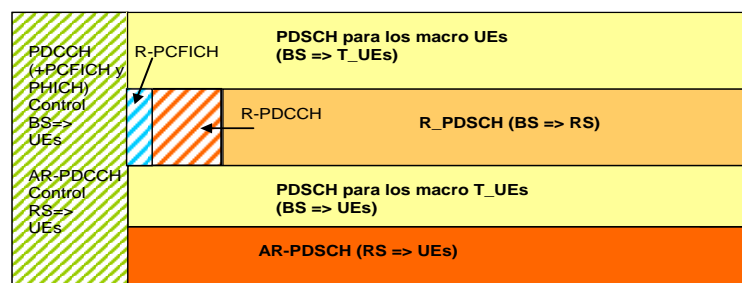


Figura B.26. Estructura de la subtrama con multiplexado en frecuencia e información de control dinámica

A la hora de dimensionar la zona de control es preciso tener en cuenta que el número de UEs bajo el dominio de un RS es significativamente menor que el número de UEs que debe ser gestionado directamente por una R_BS. Por tanto el número de indicaciones de *scheduling* enviadas por el RS es menor. Por otra parte, es importante diseñar un esquema de agregación de indicaciones para

minimizar el número de bits necesarios para su mapeo. En principio, podría ser lógico reutilizar los mismos esquemas de multiplexado elegidos para el canal PDCCH.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el enlace entre R_BS y RS es fijo y de mejor calidad que el enlace de acceso entre R_BS o RS y UE. Esto implica que en dichas comunicaciones pueden utilizarse modulaciones más altas (ej: 16QAM o 64QAM).

El resto de símbolos OFDM del RB pueden ser usados para la transmisión de datos DL al relay o a los UEs-relay. Esta zona no se puede utilizar para la transmisión de datos a los UEs macro usuarios, es decir, los conectados directamente a la estación base. Desde el punto de vista del *scheduler* el relay y los UEs relay pueden recibir cualquier recurso mientras que los UEs macro sólo pueden recibir recursos de los dedicados a los mismos.

Cada relay sabrá la información que le corresponde gracias a un identificador único en la celda, y sabrá en que zona del PDSCH o de la zona tras R-DCI buscar los datos. La Figura B.27 y Figura B.28 representan de forma resumida y en detalle la estructura de trama MAC en este tipo de relays para el caso del DL y UL respectivamente.

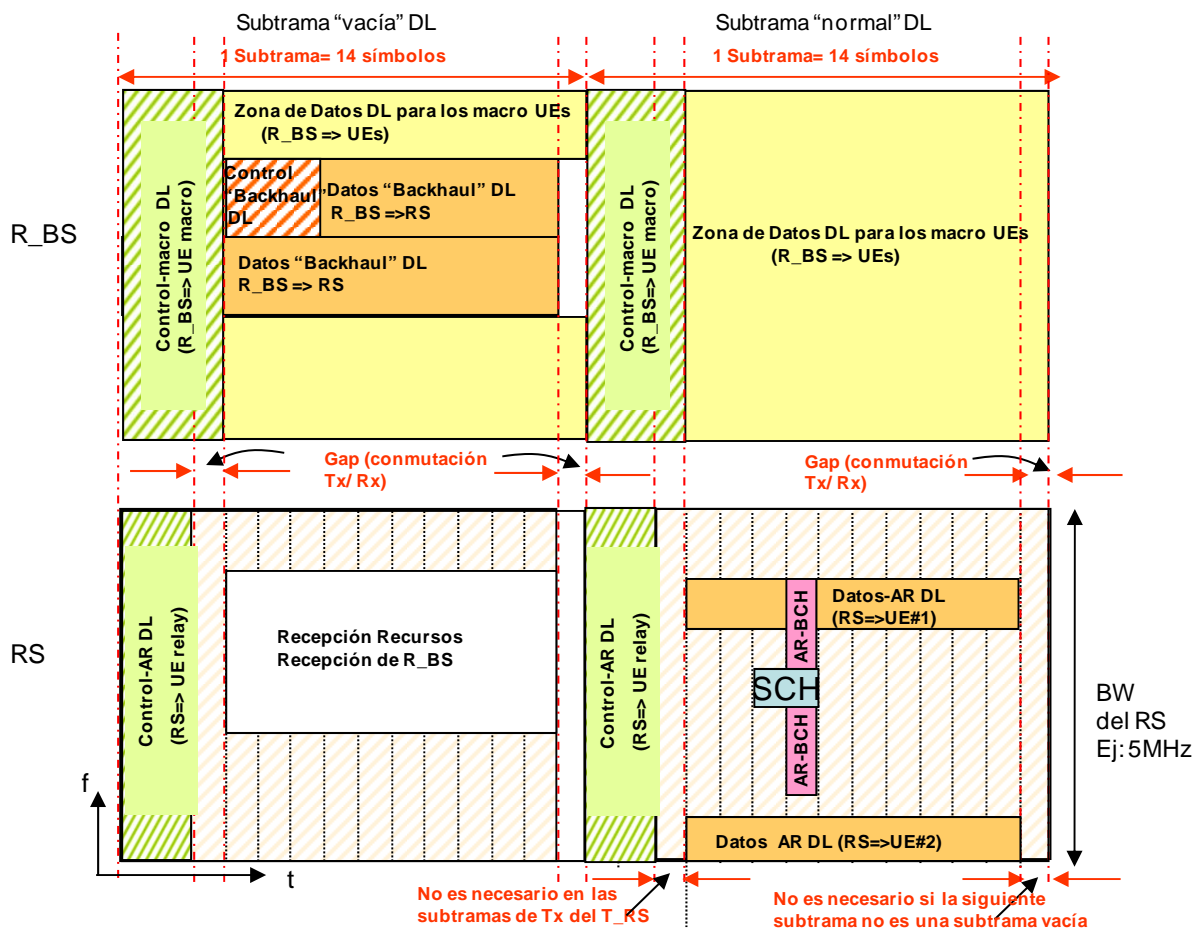


Figura B.27. Mapeado físico de canales de señalización y datos en los enlaces DL del "backhaul" y de acceso, para un relay no transparente (Transmisión R_BS y RS sincrona)

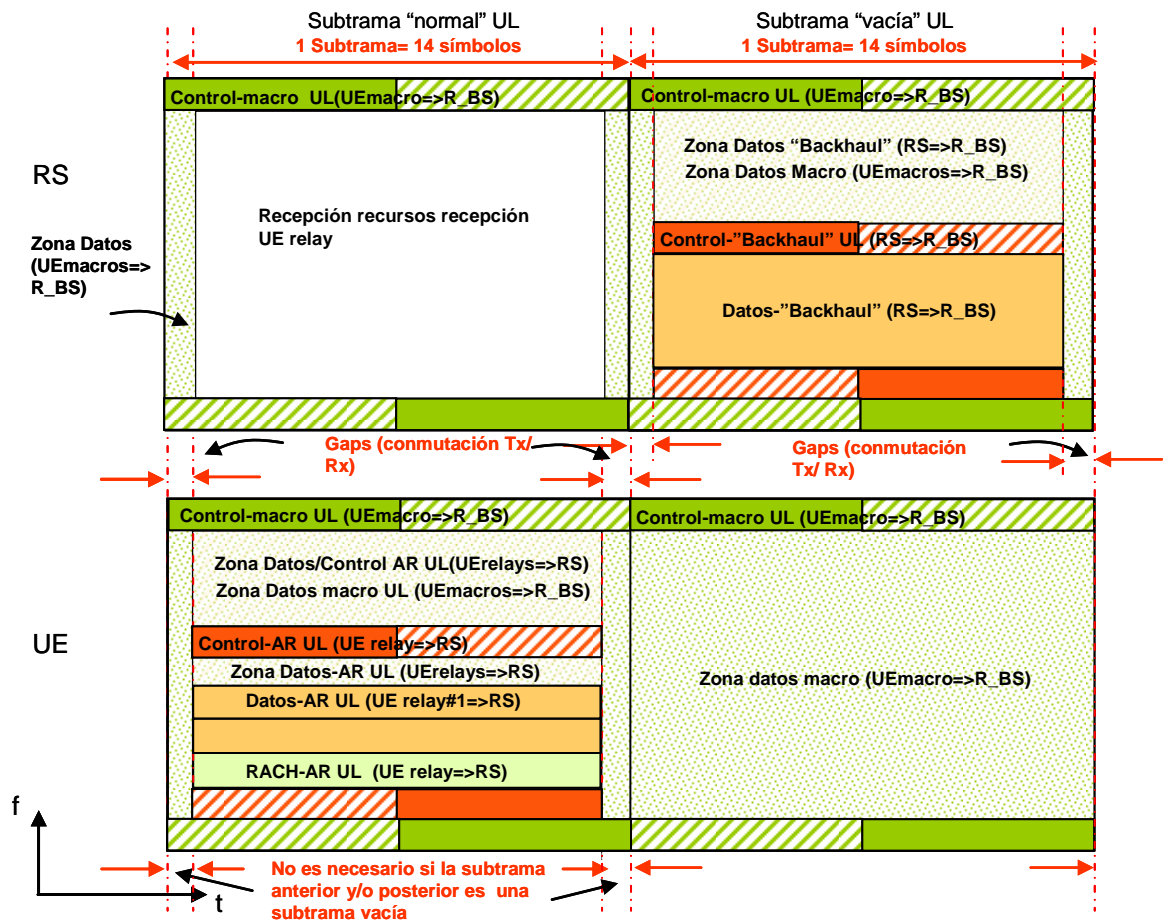


Figura B.28. Mapeado físico de canales de señalización y datos en los enlaces UL del "backhaul" y de acceso, para un relay no transparente (Transmisión R_BS y RS síncrona)

B.2. Mapeado de mecanismos de recuperación de errores

Desde el punto de vista del desarrollo de mecanismos de recuperación de errores, se asume, para las nuevas redes celulares tanto en modo infraestructura estándar como en modo relay, el uso de mecanismos H-ARQ (Hybrid ARQ). De forma simplificada éstos pueden verse como una combinación de FEC (Forward Error Correction) y ARQ (Automatic Report reQuest). Antes de proceder al estudio de HARQ para un sistema de comunicaciones móviles en modo relay se va a realizar un análisis de la temporización, que en modo estándar, supone la técnica de retransmisión.

B.2.1. Temporización HARQ

Para mantener un servicio con altas restricciones de retardo y minimización de latencia en el enlace radio se requiere minimizar el tiempo asociado a las retransmisiones H-ARQ. A la hora de determinar la temporización del proceso se va a tener en cuenta que:

- La temporización no tiene por qué ser idéntica para el enlace ascendente y descendente.
- El tiempo mínimo entre dos retransmisiones (identificado como HARQ TTI) determina las restricciones temporales de los procesos HARQ síncronos. En general se va a buscar la minimización de este tiempo.
- El número de procesos *stop&wait* paralelos asociados a un UE es igual al HARQ TTI en los HARQ síncrono.
- No se considera necesario el soporte de celdas de más de 50Km.

En la Figura B.29 y Figura B.30 se ilustra la temporización asociada al procedimiento de HARQ para los enlaces descendente y ascendente para un esquema de duplexado FDD. En ambos diagramas se supone un tiempo entre retransmisiones igual a 8 TTIs. Las variantes, en cuanto al número de TTIs transcurridos entre la primera transmisión de un paquete y su retransmisión, estarán condicionadas por el tiempo de procesado que se concede tanto a la estación base como al usuario.

Parece razonable que el tiempo de procesado en la BS sea aproximadamente igual al tiempo de procesado en el UE, porque aunque es cierto que a priori la estación base podría ser mucho más rápida en decodificar y comprobar los datos que los móviles, también es cierto que en ella se procesan muchos más paquetes provenientes de múltiples usuarios y ha de realizarse el *scheduling* para todos ellos. No obstante, hay que tener en cuenta que en la estación base es preciso esperar a recibir todo el PUSCH/PUSCH para decodificar los ACK/NACKs, mientras que en el UE, éste puede iniciar la decodificación del PDCCH sin esperar a recibir toda la subtrama, lo que implica un tiempo adicional. Estos tiempos de procesado junto a los de propagación (depende de la distancia entre UE y BS) determinarán el diagrama temporal tanto para el enlace descendente como ascendente. En la Tabla B.1. se enumeran y definen las variables temporales que intervienen en el problema, mientras que en la Tabla B.2. se recogen los tiempos de procesado requeridos para distintas opciones, en función del número de procesos HARQ.

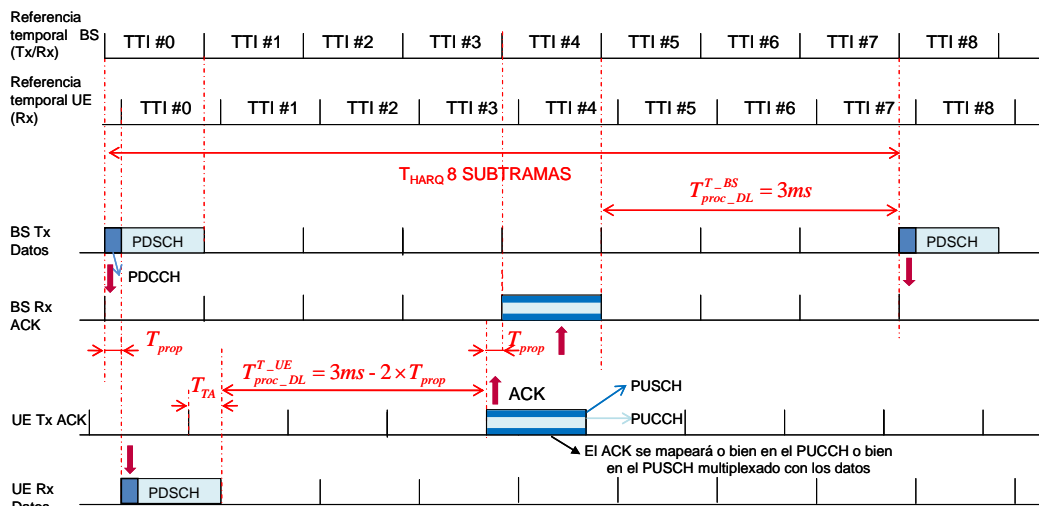


Figura B.29. Temporización para el enlace descendente en el modo FDD

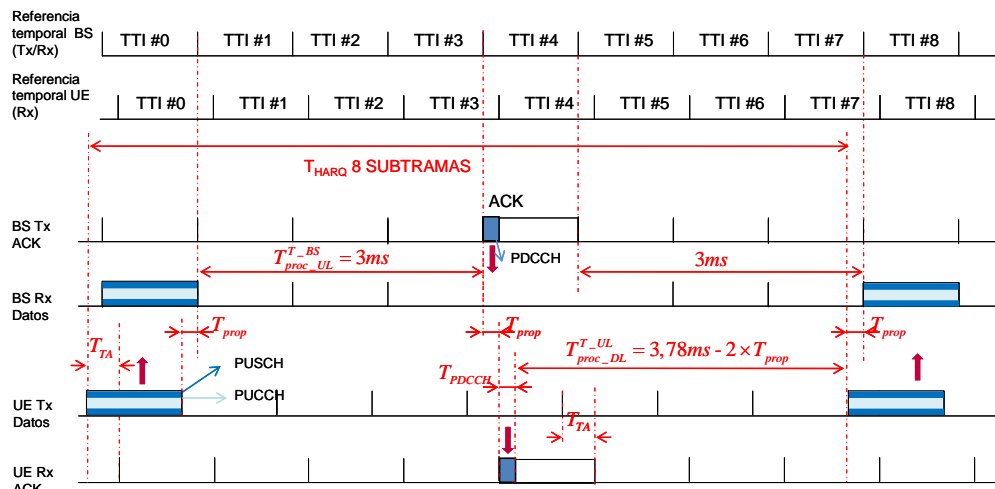


Figura B.30. Temporización para el enlace ascendente en el modo FDD

T_{HARQ}	Tiempo entre dos retransmisiones.
N_{proc}	Número de procesos HARQ.
T_{prop}	Retardo de propagación.
$T_{UL/DL}$	Tiempo de desalineamiento de trama entre la recepción en el UL y transmisión en el DL de la BS. Se ha supuesto igual a cero.
T_{TA}	Avance temporal, igual a $2 \cdot T_{prop} - T_{UL/DL}$ (se ha supuesto igual a $2 \cdot T_{prop}$).
$T_{proc_DL}^{UE}$	Tiempo mínimo desde el final de la recepción del PDCCH/PDSCH en el DL hasta el inicio de la transmisión del ACK en el UL. Incluye: Tiempo de decodificación del PDCCH/PDSCH más el tiempo de codificación del ACK y multiplexado junto con otros datos.
$T_{proc_DL}^{BS}$	Tiempo mínimo desde el final de la recepción del ACK/NACK en el UL hasta el inicio de la retransmisión del paquete en el PDSCH del DL. Incluye: Tiempo de detección y decodificación del PUCCH/PUSCH más el tiempo de scheduling y codificación PDSCH.
$T_{proc_UL}^{BS}$	Tiempo mínimo desde el final de la recepción del PUSCH en el UL hasta el inicio de la transmisión del ACK/NACK en el DL. Incluye: Tiempo de detección y decodificación del PUCCH/PUSCH más el tiempo de scheduling, de codificación del ACK y multiplexado junto con otros datos sobre el PDCCH /PDSCH.
$T_{proc_UL}^{UE}$	Tiempo mínimo desde el final de la recepción del ACK/NACK en el DL hasta el inicio de la retransmisión del paquete en el PUSCH del UL. Incluye: Tiempo de decodificación del PDCCH (que contiene el ACK/NACK) más el tiempo de codificación del PUCCH/PUSCH.
$T_{ACK/NACK}$	Tiempo de transmisión del ACK/NACK.
$T_{PUCCH/PUSCH} = T_{PDCCH/PDSCH}$	Tiempo de transmisión del PDCCH+PDSCH (o alternativamente, del PUCCH+PUSCH). El tiempo es equivalente a un TTI.

Tabla B.1. Variables temporales asociadas al proceso de retransmisión

Periodo mínimo de retransmisión	Tiempos de procesados para el DL		Tiempos de procesado para el UL	
	UE	BS	BS	UE
T_{HARQ}	$T_{proc_DL}^{UE}$	$T_{proc_DL}^{BS}$	$T_{proc_UL}^{UE}$	$T_{proc_UL}^{BS}$
6ms	$2ms - 2 \cdot T_{prop}$	2ms	2ms	$2,78ms - 2 \cdot T_{prop}$
7ms	$2ms - 2 \cdot T_{prop}$	3ms	3ms	$2,78ms - 2 \cdot T_{prop}$
7ms	$3ms - 2 \cdot T_{prop}$	2ms	2ms	$3,78ms - 2 \cdot T_{prop}$
8ms	$3ms - 2 \cdot T_{prop}$	3ms	3ms	$3,78ms - 2 \cdot T_{prop}$

Tabla B.2. Tiempos de procesado requeridos para HARQ=6,7,8 ms

En cualquier caso, en general, puede considerarse más o menos alcanzable un retardo mínimo global antes de proceder a la retransmisión del paquete original de entre 6ms, para la mayor parte de los despliegues, y 8 ms, para celdas de gran cobertura.

B.3. HARQ en modo Relay

Para el estudio de HARQ en las comunicaciones en modo relay, la primera característica a tener en cuenta es si el relay opera en modo transparente o no transparente, ya que de ello dependerá directamente el enlace en el que debe transmitirse la señalización. Junto con ello será necesario distinguir por una parte los casos en los que el *scheduling* es centralizado de los casos en que es distribuido, y por otra parte los casos en que el relay tiene una única radio de los casos en que tiene múltiples.

B.3.1. Relays transparentes (Tipo 2)

En el DL toda la información de control mapeada en los recursos PDCCH es únicamente enviada por R_BS hacia todo tipo de usuarios y hacia el relay (en cuyo caso hablamos de canal R-PDCCH), los datos que sean enviados hacia los macro usuarios se mapearán en el canal PDSCH y los que deban ser enviados a los usuarios conectados a un relay sufrirán dos fases, un primer envío en el enlace *backhaul* en el canal R-PDSCH y un segundo envío desfasado temporalmente (al menos un TTI y dependiendo del caso) respecto al anterior en el que dichos datos se retransmiten en el canal AR-PDSCH. Para el caso del UL el canal de control PUCCH será enviado siempre directamente entre UEs y R_BS, la señalización referente al relay (canal R-PUCCH) se envía en el enlace *backhaul*, los datos de los usuarios macro (PUSCH) se mandan directamente entre UE y R_BS y los datos de los usuarios enganchados a un relay se transmiten en una primera fase en el canal AR-PUSCH en el enlace *access* y en una segunda desfasada temporalmente en el enlace *backhaul* en el canal R-PUSCH.

En el modo de funcionamiento transparente el tipo de *scheduling* que se planifica por defecto es el centralizado, ya que si la estación base es la encargada de transmitir la señalización hacia todos los relays y usuarios, y los UEs no deben ser conscientes de la existencia de los RSs, será lógico planificar a la estación base como la entidad que se encargue de recibir los *reports* de cómo ha ido la transmisión y asignar los mismos (HARQ estático) o distintos (HARQ dinámico) RBs en el caso en que sea necesario retransmitir. Por ello un *scheduling* distribuido en este caso no resulta coherente, pues ni los UEs son conscientes de la existencia de los RSs ni los relays tienen capacidad de señalizar control a los usuarios. Este tipo de relays puede trabajar en modo cooperativo con la estación base, como se explica en el Anexo A, o de forma independiente.

Modo cooperativo en las retransmisiones

Para el caso de cooperación entre R_BS y relays de Tipo 2, el esquema a seguir en HARQ para el DL y UL se ilustran en la Figura B.31 y Figura B.32 respectivamente.

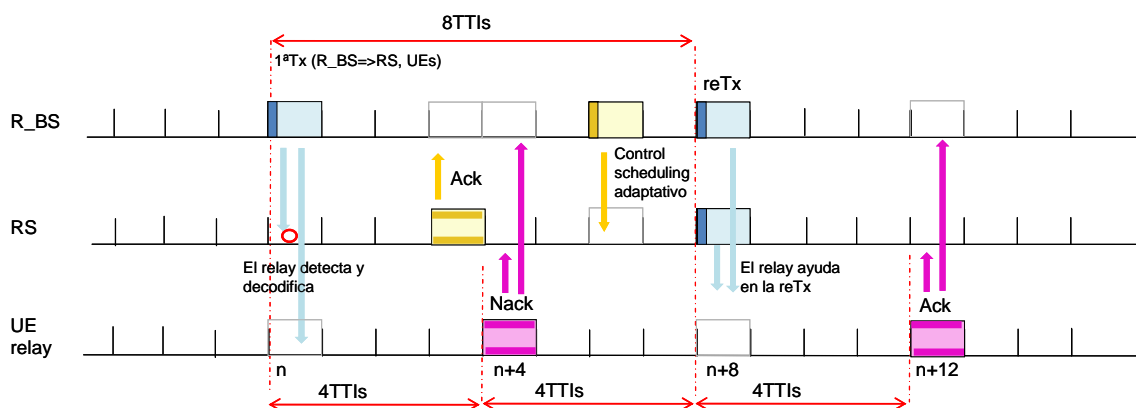


Figura B.31. Relay transparente. HARQ en modo cooperativo para reTx en el DL

De forma general, el objetivo en el DL es que, en primera instancia, sea la R_BS quien transmita toda la señalización y los datos a los UEs y a los relays (que procederán a su decodificación, exclusivamente). Los relays muy probablemente recibirán los datos de manera correcta gracias a las mejores condiciones del canal *backhaul*, lo que comunicarán mediante un ACK a la R_BS a través del canal de control del UL para este enlace (R-PUCCH). El UE mandará el ACK/NACK a la estación base,

que será monitorizado por el RS. En caso de que exista una mala recepción del paquete en el UE, el móvil mandará un NACK que escucharán tanto el relay como la estación base. Tras la recepción del NACK, el RS recodificará el paquete recibido y lo retransmitirá al mismo tiempo que la R_BS. Dado que el RS es transparente para el UE, el *scheduling* se hace en base a estimaciones canal (CQI) que son la suma del canal R_BS a UE y RS a UE. Si tras el envío simultáneo de RS y R_BS (en el mismo RB) la recepción es correcta, el UE envía el correspondiente ACK.

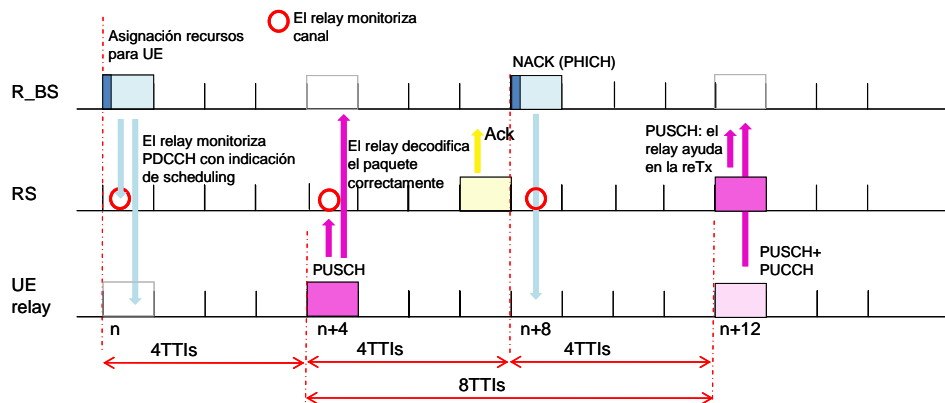


Figura B.32. Relay transparente. HARQ en modo cooperativo para reTx en el UL

Para el UL el planteamiento es similar pero a la inversa. Tras la recepción por parte del UE de la indicación de *scheduling* para el UL procedente de la R_BS (el RS detecta también dicha indicación, por lo que sabe cuándo, dónde y cómo va a recibir la transmisión inicial del UE), el usuario lleva a cabo la primera transmisión del paquete. La primera transmisión dirigida a la R_BS es decodificada tanto por la estación base como por el relay, que tendrá más probabilidades de decodificar correctamente el PUSCH. En su caso, el RS envía un ACK a la R_BS a través del canal de control del enlace R_BS<->RS, para indicarle que ha sido capaz de decodificar correctamente. En la misma subtrama que el relay envía el ACK/NACK, la estación base debe mandar la confirmación de recepción correcta o incorrecta al UE, que es también monitorizada por el RS. Si la notificación es un NACK, el UE y el RS retransmitirán simultáneamente el paquete hacia la estación base.

En este esquema de cooperación para el UL, pueden surgir problemas para que la R_BS pueda decodificar correctamente los canales de control transmitidos por el UE si éstos se mandan multiplexados con los datos en la retransmisión dentro del PUSCH (por ejemplo, los ACK/NACKs, para el PDSCH transmitido en la subtrama n+8, o los informes sobre el estado del canal (CQI) del UE, etc). Cabe recordar, que el procedimiento normal es que el UE multiplexe los ACK/NACKs, CQI y SR en el campo de datos (PUSCH) si tiene algo para transmitir, de tal forma que el canal físico PUCCH sólo se usa si no hay nada para transmitir. RS y UE cooperan en la retransmisión tal y como se ilustra anteriormente, sin embargo, en el UL, el contenido del canal de control UL no puede ser conocido por el RS de antemano, por lo que no cooperará en su transmisión y sólo reenviará los datos en el PUSCH. Como resultado en la estación base se recibe el control UL únicamente del UE. Por el contrario, los datos y las señales de referencia (para demodular los datos retransmitidos) son recibidos tanto del UE como del RS, de forma superpuesta. Como el relay amplifica las señales de referencia, la R_BS no dispone de pilotos de referencia adecuados para demodular correctamente las señales de control del UL, ya que ésta se ve únicamente afectada por el canal UE <->R_BS. Como resultado, el contenido del canal de control UL se pierde, siendo especialmente grave las pérdidas de los reconocimientos ACK/NACK. Para combatir este problema se pueden plantear algunas alternativas al esquema propuesto anteriormente.

- Solución 1. La solución más obvia es evitar el envío de PDSCH en la subtrama n+8, de tal forma que no se precise el posterior envío de ACK/NACKs por parte del UE. Es decir, se trata de evitar el envío del canal de control PUCCH multiplexado con los datos. El problema es que se imponen restricciones que degradan la eficiencia del sistema y complican también las funcionalidades del *scheduling*, además de que no resuelve todos los conflictos.

- Solución 2. Bloquear la retransmisión del UE. En este caso (ilustrado en la Figura B.33) la R_BS mandaría un ACK al UE y un NACK al RS, encargándose únicamente el RS del envío de la retransmisión. En este caso, el RS envía el PUSCH y el UE la información de control UL. Ahora, dado que el UE no tiene que transmitir datos, puede enviar el PUCCH utilizando RBs diferentes a los utilizados por el RS para transmitir el PUSCH. Si el paquete original se recibió correctamente en el RS, la retransmisión tiene una alta probabilidad de producirse de forma correcta, gracias a la mayor estabilidad del enlace *backhaul* y a la posibilidad de hacer un HARQ asíncrono/adaptativo (Figura B.33).

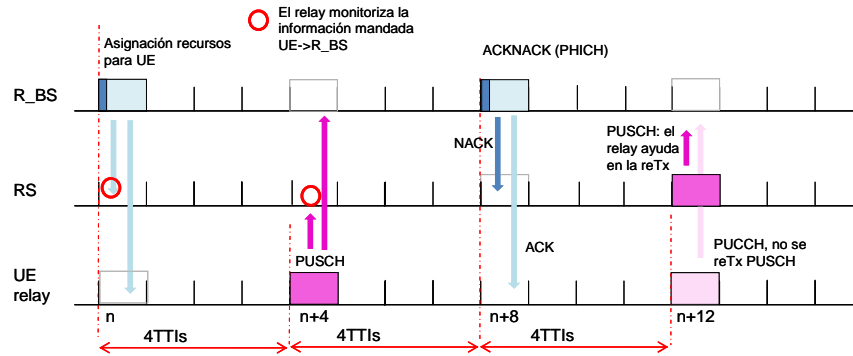


Figura B.33. Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2

En el caso de que se produzca un error en la decodificación del paquete original, la R_BS solicitaría la retransmisión al UE con una nueva indicación explícita en la subtrama n+16, tal y como se ilustra en la Figura B.34.

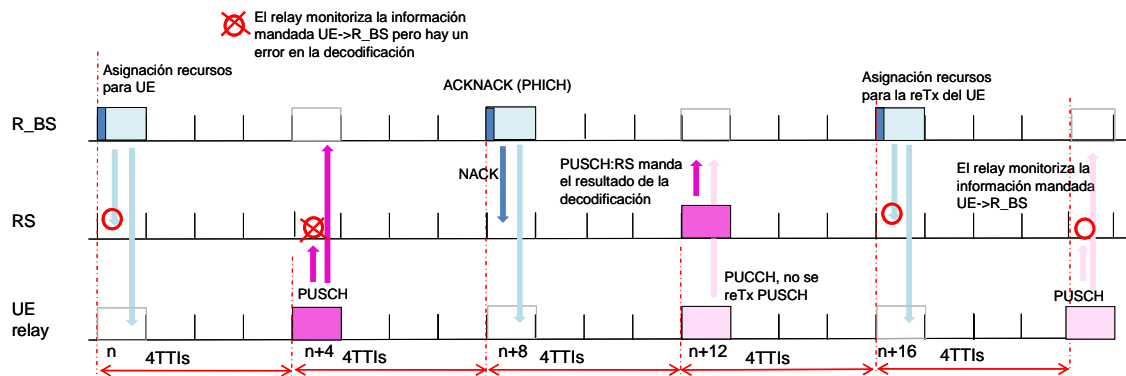


Figura B.34. Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2, recuperación de error en la decodificación del paquete original

Si por el contrario, se produce un error en la retransmisión del RS, la R_BS enviará la solicitud de transmisión únicamente al RS, de acuerdo con el diagrama de la Figura B.35.

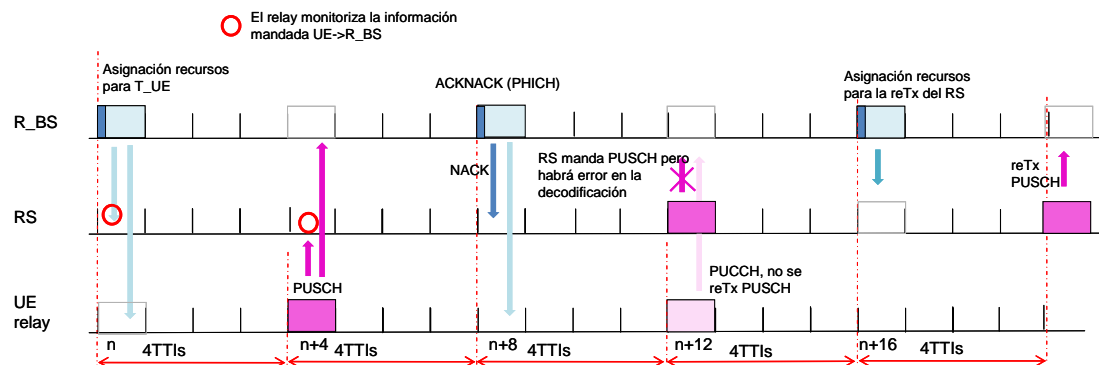


Figura B.35. Relay transparente. HARQ para reTx en el UL. Solución 2, recuperación de error en la retransmisión

Además de esto, los relays de tipo 2 presentan otros inconvenientes adicionales relacionados con el mapeado de las tramas *backhaul* y la gestión de los tiempos de conmutación Tx/Rx en el relay. Es preciso tener en cuenta que el UE transmite durante toda la subtrama mientras que el relay no puede transmitir y recibir simultáneamente en el UL (o DL) por lo que necesita un tiempo de conmutación de al menos un símbolo. La no pérdida de información implica que: en las tramas *backhaul* del UL el RS debe transmitir en toda la subtrama para poder colaborar con el UE y también debe disponer de toda la subtrama, cuando el UE envía la primera transmisión. La conmutación se produciría en otras subtramas, en el caso de requerirse.

Modo cooperativo durante toda la transmisión

En caso de entornos bastante hostiles, podría asumirse que en el caso del DL, el UE no va a recibir correctamente la primera transmisión. En su defecto, se asume que ésta va a ir dirigida al RS, junto con la información de control. Es posible que dicha información de control se mande, junto con los datos, multiplexada dentro del canal R-PDSCH, ya que el formato de la transmisión en el canal R-PDSCH del enlace *backhaul* depende de la propia calidad de éste. Por otra parte, dado que la calidad del enlace *backhaul* es en general buena, podrían utilizarse esquemas de modulación altos. Lo que sí se puede asumir es que el UE en la primera transmisión de la R_BS, puede decodificar el PBCH y otra información de control desde la estación base (por ejemplo ACKs, etc). Alternativamente, en lugar de enviar la información de *scheduling* en esta primera transmisión, la R_BS podría enviarla en un mensaje de señalización explícita posterior, tal y como se ilustra en el la Figura B.36. En cualquier caso, la necesidad de envío de esta información implica un *overhead* adicional. El RS decodifica y confirma la recepción de la primera transmisión a la R_BS y luego ambos transmiten el PDSCH (AR-PDSCH en el enlace *access*) de acuerdo con la información de *scheduling* previamente señalizada. El UE recibe la información de control, únicamente de la R_BS. El formato elegido para la transmisión en el PDSCH debe basarse en la combinación de la estimación del canal R_BS a UE y RS a UE.

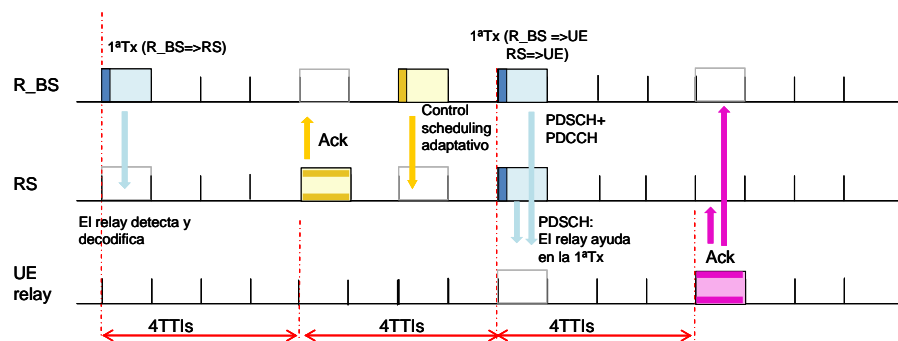


Figura B.36. Relay transparente. HARQ en modo cooperativo para 1ª Tx y posteriores reTx en el DL

Modo no cooperativo

A diferencia del modo cooperativo, este modo está pensado para que los UEs que se encuentran en malas condiciones reciban únicamente los datos por parte del relay y no por R_BS y RS simultáneamente.

Sin embargo, dado que la comunicación directa entre UE y R_BS no es factible, el RS debe intervenir retransmitiendo toda la información de control entre ambas entidades (dicha retransmisión incluye además de PDCCH, PCFICH, ACK/NACKs, el PBCH). En el modo transparente cada vez que deba ser transmitida información de control a los UEs ésta deberá ser indicada por R_BS.

La temporización del proceso HARQ en el DL se ilustra en la Figura B.37. En este caso, la R_BS envía el PDSCH al relay junto con la información de control de *scheduling* (en su caso). Éste decodifica la señal y envía el ACK a través del canal de control a la R_BS.

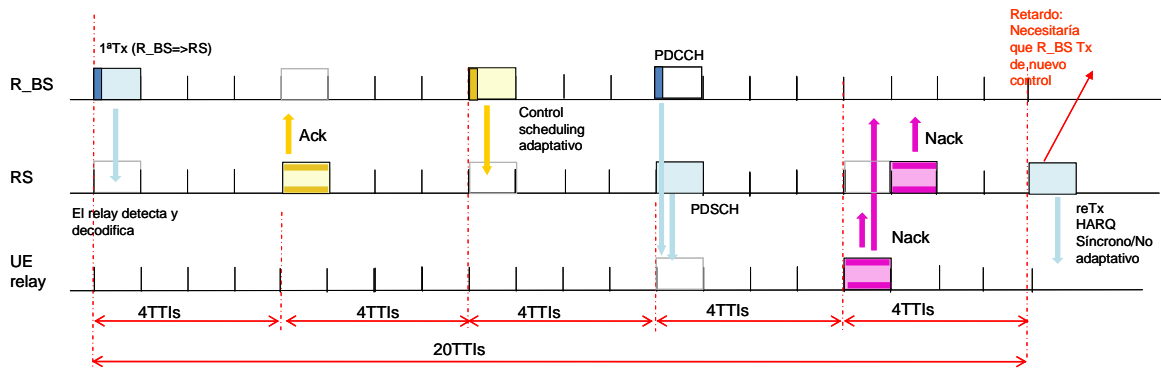


Figura B.37. Relay transparente. HARQ no cooperativo entre R_BS y RS. Temporización HARQ enlace descendente (DL)

El modo no cooperativo no parece muy adecuado para ser implementado en los relays transparentes, pues si los UEs que se encuentran en malas condiciones con R_BS han de recibir la señalización por parte de las estaciones base y los datos por parte de los relays, y cada vez que surge un problema en la comunicación la transmisión debe ser efectuada en parte por la R_BS (control) y en parte por RSs (datos) con el retardo que ello implica, la ganancia del proceso en modo relay es muy cuestionable.

Modo Cooperativo y no cooperativo con duplexado FD

En este apartado se analizan las implicaciones de la existencia de dos cadenas RF para Tx y Rx tanto en el UL como en el DL. La más directa es la ausencia de huecos para la conmutación entre modo Tx y Rx, lo que permite un incremento de *throughput* y minimiza la probabilidad de pérdida de información.

Si los relays tienen la capacidad de transmitir y recibir de manera simultánea en el enlace *backhaul* y en el enlace de acceso, los conflictos asociados al hecho de que coincida en la misma subtrama la necesidad de enviar/recibir ACK/NACK con la necesidad de recibir/enviar datos, se verían reducidos. En cualquier caso, se requiere la multiplexación temporal y/o frecuencial de los recursos utilizados para Rx y Tx.

En el caso de transmisión transparente cooperativa, dado que RS y R_BS no colaboran en la retransmisión de la señalización de control y asumiendo el multiplexado frecuencial de los canales de datos, la mayor parte de los conflictos identificados en los esquemas con duplexado TD no llegarían a producirse. No puede decirse lo mismo del esquema de transmisión no cooperativa.

Así pues el esquema de temporización del proceso HARQ es similar excepto en las posibles ventajas de evitar posibles choques entre varias comunicaciones cuando éstas existan.

B.3.2. Relays no transparentes (Tipo 1)

El modo no transparente es el modo de funcionamiento asociado a los relays Tipo-1. En este modo los relays funcionan desde el punto de vista del usuario de manera idéntica a como lo hace una estación base. Tiene su propio identificador de celda (Cell ID) siendo consciente el UE de su presencia, lo que permite acordar ligeras modificaciones en la estructura MAC. Las implicaciones de este modo de funcionamiento, que pueden tener impacto sobre los esquemas de recuperación de errores, son:

- El UE está conectado a la R_BS o al RS, pero no a ambos simultáneamente. Esto imposibilita la definición de esquemas de transmisión cooperativa entre R_BS y RS o entre RSs.
- El RS puede reutilizar de forma independiente los mismos recursos que la estación base, aunque si no hay algún tipo de coordinación entre RS y R_BS aumenta la interferencia, por lo que es preciso establecer algún tipo de acuerdo entre ambos.

- Aunque los enlaces R_BS a RS y RS a UE pueden ser de calidad comparable a una comunicación R_BS a UE macro, la cantidad de recursos necesarios es el doble, por lo que la ganancia de capacidad, 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, las comunicaciones pueden sufrir interferencias adicionales.
- El relay incluye señalización de control HARQ (ACK/NACK), lo que implica que el HARQ se aplica a cada salto.

En el modo de funcionamiento no transparente puede contemplar el caso de *scheduling* centralizado o *scheduling* distribuido dependiendo de si es la R_BS o el RS quien gestiona los recursos a asignar tanto para la primera transmisión de un paquete como para las posibles retransmisiones.

La señalización HARQ será enviada en el enlace de acceso al relay (enlace RS<->UE) en los canales AR-PDCCH y AR-PUCCH, de acuerdo con la nomenclatura definida anteriormente.

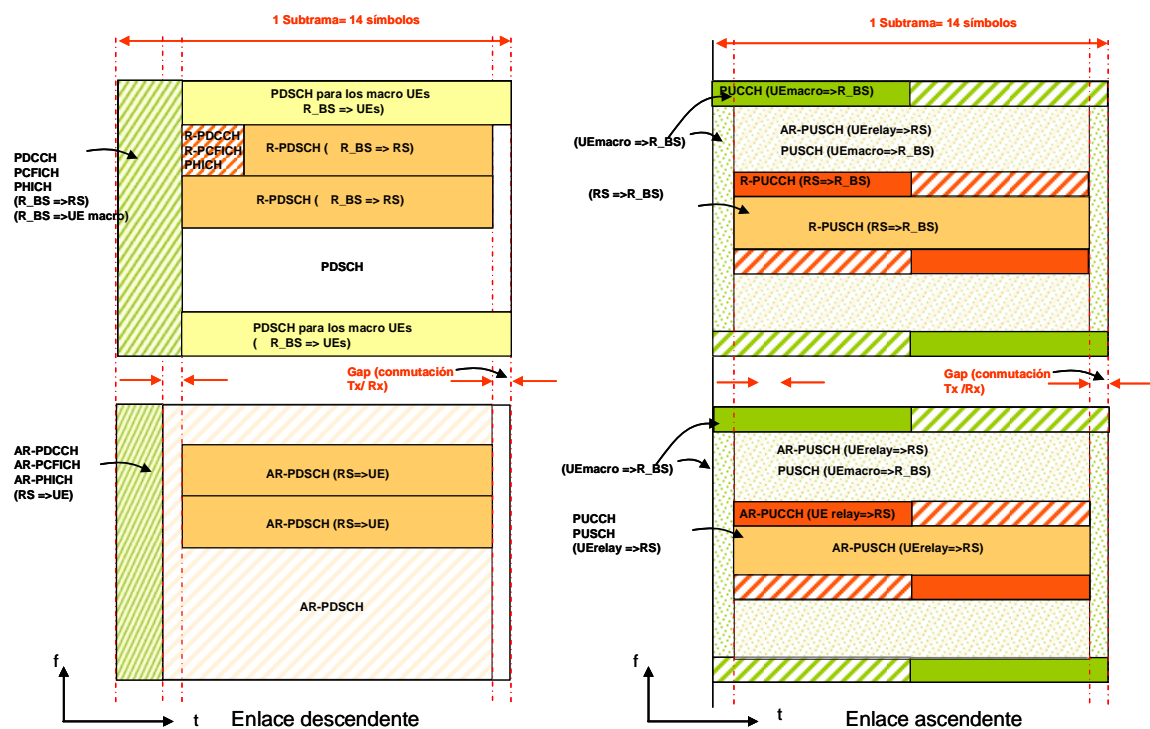


Figura B.38. Mapeado físico de canales de señalización y datos en los enlaces "backhaul" y de acceso, para un relay no transparente

Al igual que en el caso de los relays no transparentes, se analiza en primer lugar el soporte con multiplexado TD del enlace *backhaul* y acceso relay, identificando más adelante si existen peculiaridades del soporte FD. Las restricciones del mapeado físico de los distintos canales de control y datos sobre la estructura de trama, para el caso del multiplexado TD, se ilustra en la Figura B.38, excluido el hecho de que el RS no puede transmitir y recibir simultáneamente en la misma banda.

Implicaciones de la estructura de señalización en el backhaul

A continuación se resumen las principales características de esta señalización que repercuten, de forma general, en el esquema de mapeado HARQ.

- El R-PDCCH incluye la asignación de recursos (RBs) para el *backhaul* en esa subtrama o en subtramas posteriores, es decir incluye las indicaciones de *scheduling* para el R-PDSCH y R-PUSCH. La posición y un número de recursos reservados para el mapeado del canal de control R-PDCCH se puede preconfigurar de forma semiestática aunque su tamaño se puede variar de

forma dinámica para adaptarse a las necesidades de señalización en el *backhaul*. Parece lógico mapear el canal de control R_PDCCH en la subtrama a continuación del tamaño máximo del canal PDCCH. En principio, se asume que se expande en toda la banda frecuencial pre-asignada al enlace *backhaul*. En la medida de lo posible es preferible pre-asignar a los RS RBs en el centro de la banda, ya que de esta forma nos aseguramos que un RS con menor ancho de banda es capaz de recibir información de la estación base. El número de símbolos dedicados a R-PDCCH también se puede variar dinámicamente e indicar a través del canal R-PCFICH de forma similar a como se hace en el PCFICH. Otra opción es preconfigurar el número o señalarlo de forma semiestática a través de señalización de capas superiores, con lo cual no es necesario el canal R-PCFICH. El canal R-PCFICH se mapea en el primer símbolo disponible pero se puede ensanchar en frecuencia para obtener ganancia por diversidad. Asimismo es posible señalar la ampliación del número de RBs que contienen señalización de control.

- R-PCFICH indica la cantidad de símbolos (si los RBs están asignados de forma pre-estática) dedicados al R-PDCCH. Si el número de RBs puede ser dinámico pero el número de símbolos OFDM que ocupa el canal de control es estático, entonces R-PCFICH sólo indica el número de RBs que ocupa R-PDCCH, y si tanto el número de RBs como de símbolos pueden ser dinámicos, entonces se indican ambos parámetros. Si el R-PDCCH se configura de forma estática, no haría falta la existencia de R-PCFICH.
- Siempre se pueden asignar recursos R-PDSCH o R-PUSCH en la zona de PDSCH/PUSCH para las transmisiones UL/DL de datos hacia o desde el RS. No obstante, se precisan esquemas de coordinación para evitar la interferencia.
- En lo referente al formato de las indicaciones de *scheduling* (R-DCI) que se mapean en el R-PDCCH es preciso tener en cuenta las siguientes opciones, debido a su repercusión en el mapeado ACK/NACK y a su aplicabilidad o no en función del esquema de *scheduling* aplicado (centralizado o distribuido):
 - Uso de una indicación de *scheduling* independiente para los datos asociados a cada uno de los UE relay, en la conexión R_BS a RS. Esta opción implica una elevada señalización debido a la especificación del esquema MCS y HARQ para cada caso, de forma independiente. En el PDSCH o PUSCH, se manda un bloque de transporte para cada UE. Es preciso enviar un ACK/NACK por cada bloque de información dirigida a un UE relay. Para reducir el *overhead*, se puede optar por varios esquemas de agregación en el *backhaul*, como se estudia en las siguientes opciones.
 - Agregación a nivel de bloque de transporte (TB: *Transport Block*). Para reducir el *overhead* se pueden agregar las transmisiones de varios UEs en un solo bloque de transporte, aplicando un único esquema de codificación y modulación. Del mismo modo el tráfico de varios UEs se puede agregar en el UL en un solo bloque de transporte. La aplicación de la agregación, que podría hacerse por clases de servicios, reduce el *overhead* en el R-PDCCH.
 - Agregación a nivel MAC. En este caso, en lugar de hacer la agregación a nivel de bloque de transporte se puede hacer a nivel MAC. El esquema es muy similar. Se agrupan las SDU (*Service Data Unit*) MAC de cada UE y se construye R-MAC (*Relay MAC*) compuesto por la concatenación de las MAC SDU de cada UE relay junto con una cabecera que indica la identidad del UE destinatario de cada uno de los MAC SDU que están agregados en el R-MAC. Cuando el RS recibe el R-MAC lo envía a capas superiores para su procesamiento. Si hay varios MAC SDU pertenecientes al mismo UE no es preciso señalarlos de forma independiente. Las ventajas son similares a las del método 2 de agregación por TB ya que en el enlace *backhaul* sólo se transmite un Relay-TB conteniendo datos de forma agrupada. Además se envía un ACK correspondiente a todo el bloque. Además de esto, permite que el relay pueda posteriormente reensamblar el MAC SDU y segmentarlo de nuevo de acuerdo con las condiciones de canal del enlace de acceso al relay.

En resumen, al implementar cualquiera de los dos esquemas agregación a nivel MAC o TB-método 2, entre R_BS y RS, sólo se manda un ACK por bloque de datos enviados, independientemente de que esos datos sean de un UE o de otro. El mapeado del ACK en el canal R-PUCCH se corresponde de forma implícita con el RB o el índice del canal PDCCH que señala la asignación de recursos para el Relay-TB, con un planteamiento idéntico al usado en las comunicaciones infraestructura estándar. Si consideramos la aplicación de un *scheduling* distribuido, esto no tiene una repercusión relevante en el mecanismo de recuperación de errores, ya que hay una clara separación entre el HARQ aplicado nodo a nodo y las estrategias ARQ a nivel RLC entre R_BS y UE. Por el contrario, la aplicación de un esquema de *scheduling* centralizado, donde podría tener más sentido la señalización explícita de los RBs asociados a cada UE relay en el *backhaul*, requiere un análisis más detallado.

Scheduling centralizado

En el caso de aplicar un *scheduling* centralizado (que en cualquier caso puede ser semi-persistente o dinámico), es la R_BS quien asigna el formato de transporte tanto para la primera transmisión como para las retransmisiones. Esto significa que la R_BS debe informar al RS sobre el *scheduling* que debe aplicar a los UEs que están bajo su dominio. Esta indicación de *scheduling* puede ser señalizada de forma explícita al RS o bien éste puede derivarla implícitamente del *scheduling* entre R_BS y RS.

Hay que tener en cuenta que la R_BS precisa recibir información del canal entre RS y UE, lo que introduce retardo adicional sobre la temporización estándar de la estimación del estado del canal. Esto implica una mayor dificultad de la R_BS para seguir las variaciones del canal, con lo cual la eficacia de la aplicación de estrategias de *scheduling* dinámicas y selección adaptativa de formato de transporte se puede ver reducida. Se incrementa la señalización entre el RS y la R_BS: información de *scheduling reports* sobre el estado del canal entre el RS y UE, información sobre el estado de los búferes de tráfico de los UE. La R_BS necesita saber cuándo se produce una retransmisión en el enlace RS a UE, para ello requiere recibir señalización del RS y mandar las indicaciones de *scheduling* para la retransmisión considerando dicha información.

Sobre la base de todas estas consideraciones, desde el punto de vista de la temporización y mapeado de los mecanismos de recuperación de errores (ACK/NACKs), se pueden distinguir varias opciones de implementación asociadas a las combinaciones de los siguientes aspectos.

- HARQ nodo a nodo o extremo a extremo.
- HARQ síncrono/asíncrono adaptativo o no adaptativo.
- Transporte explícito de datos dirigidos a los UE relays en el *backhaul* o agregación.

Analizando en primer lugar los procesos HARQ para el DL, la Figura B.39 ilustra la temporización de un HARQ síncrono/no adaptativo nodo a nodo, con transporte agregado en el *backhaul*, utilizando el método 2 de agregación a nivel de TB o agregación a nivel MAC.

En la subtrama n , la R_BS envía la primera transmisión al RS. El R-PDCCH se usa para hacer indicaciones de *scheduling* de los RBs reservados para R-PDSCH y R-PUSCH en esta trama o en posteriores y para indicar el mapeado de los bloques de transporte relay sobre el R-PDSCH o R-PUSCH. El RS, en la subtrama $n+4$, únicamente mandará un ACK/NACK (en el R-PUCCH, salvo que se envíen datos) por cada bloque de transporte agregado enviado entre RS y R_BS. Para ello utilizará un mapeado implícito entre el RB utilizado y el recurso dedicado en el R-PUCCH para el envío del ACK (en la figura se identifica como R-ACK). Asimismo, de forma explícita, en la subtrama n , la información de *scheduling* a utilizar en el enlace *access* por parte del RS, se transporta en el R-PDSCH. El RS construirá su propio PDCCH (AR-PDCCH) de acuerdo con dicha información en la subtrama $n+4$. Asumiendo que, para limitar la interferencia, no está permitido el *scheduling* de los mismos recursos frecuenciales para las transmisiones R_BS a UEmacro y RS a UE, en la subtrama, podría asumirse que la R_BS manda dicha información de *scheduling* de forma virtual directamente a los UEs.

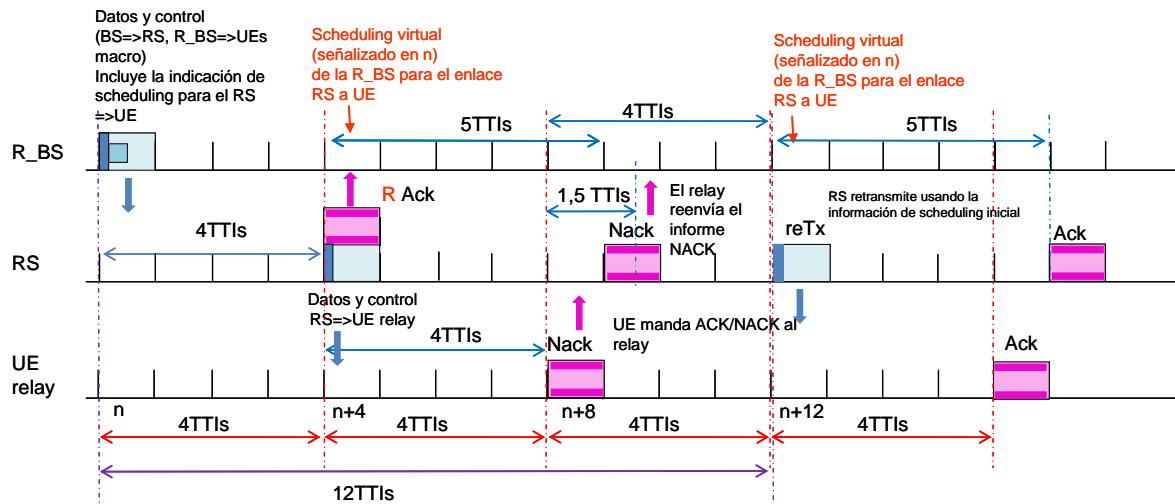


Figura B.39. HARQ síncrono/no adaptativo, nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Transporte agregado en el backhaul. Enlace DL

En definitiva, en la subtrama $n+4$, si la transmisión en el R-PDSCH ha sido correcta, el RS mandará un R-ACK hacia la estación base y la transmisión continuará hacia los UEs relay en la subtrama $n+8$. Los UE relays direccionados serán capaces de enviar su propia señalización ACK/NACK hacia el RS, que la reenviará a la R_BS en la siguiente subtrama. El envío del ACK/NACK por parte de un UE, que no tiene datos en el UL, se puede hacer en el AR-PUCCH. En caso de envío de un NACK, y asumiendo el soporte de estrategia HARQ síncrona/no-adaptativa, el RS puede proceder a la retransmisión utilizando los mismos recursos físicos previamente asignados, sin necesidad de esperar a la indicación de *scheduling* de la R_BS, aunque ésta obviamente tiene conocimiento anticipado de la retransmisión que efectuará el UE.

Por el contrario, si tal y como se ilustra en la Figura B.40 se usa un HARQ síncrono/ adaptativo o HARQ asíncrono, la R_BS será la encargada de decidir el formato y recursos que se van a utilizar en la retransmisión.

En cualquiera de los dos casos analizados, la recepción errónea de los datos en la subtrama n implica la solicitud de retransmisión a la R_BS (no procediéndose al reenvío por parte del RS) y del consiguiente decalado de todo el proceso en 8 subtramas.

Es preciso puntualizar, que atendiendo a las temporizaciones analizadas en el apartado correspondiente, se ha escogido un tiempo de 4 TTIs para el procesado en cada uno de los nodos, no obstante, en algunos casos dicha temporización se puede reducir a 2 o 3 TTIs.

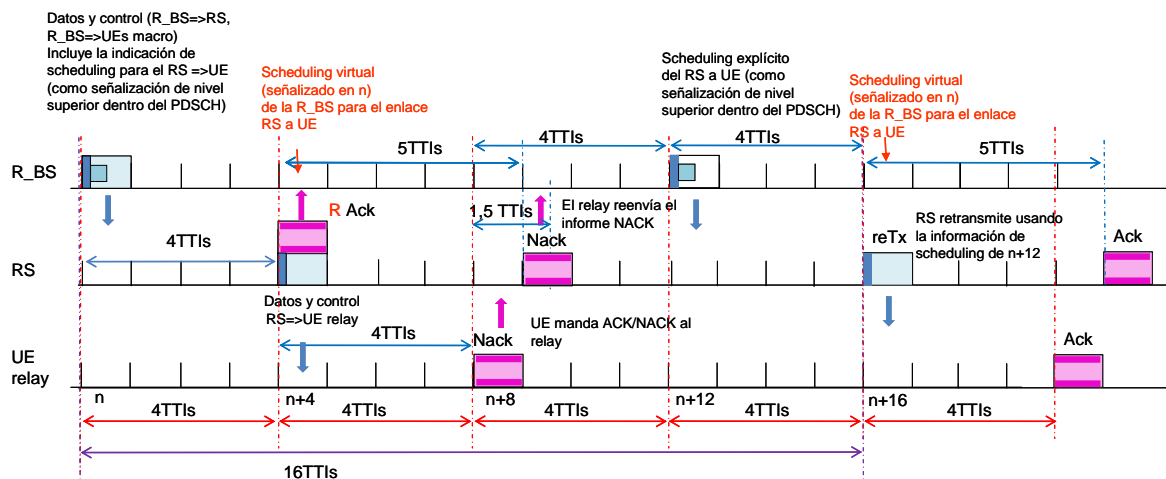


Figura B.40. HARQ síncrono/ adaptativo, nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Transporte agregado en el backhaul. Enlace DL

En el caso de no considerar transporte agregado en el backhaul, el RS enviaría en la subtrama $n+4$, tantos ACKs como UE relay son destinatarios de los datos que viajan por el *backhaul* (en la Figura B.41 se identifica como U-ACK). Si no se aplica agregación, los ACK/NACK se mapean en el R-PUCCH de forma implícita en función del RB utilizado.

Dado que el RS es capaz de identificar bloques de transporte erróneos de forma individual para cada UE, podrían contemplarse dos opciones de implementación:

- La primera se ilustra en la Figura B.41. En este caso, en la subtrama n la R_BS manda únicamente los datos al RS, tras la recepción de los ACK/NACKs (en este caso directamente vinculados a datos de UEs), y en la subtrama $n+8$ la R_BS manda de forma explícita la información de *scheduling* a aplicar en el enlace de acceso por parte del RS, para los flujos correctamente recibidos por el RS. Este planteamiento obviamente supone un retardo considerable.
- Alternativamente, se puede asumir que la R_BS envía junto con la primera transmisión la información de *scheduling* para el enlace de acceso. El RS, en la subtrama $n+4$, encaminará los datos hacia los UEs involucrados respetando el *scheduling* pre-asignado. En este caso, podría optarse por reenviar los datos recibidos correctamente dejando vacíos el resto de recursos. El procedimiento en todo caso implica la aplicación de un *scheduling* adaptativo para proceder a la recuperación de los datos no enviados.

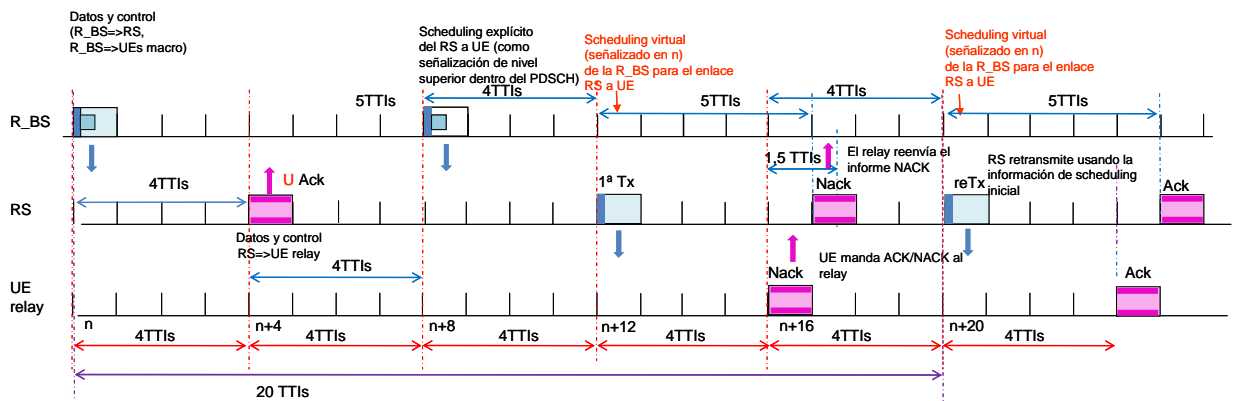


Figura B.41. HARQ síncrono/no adaptativo, nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Transporte no agregado en el backhaul. Enlace DL

Por último, la Figura B.42 ilustra la aplicación de un esquema HARQ extremo a extremo. En este caso, la recuperación de errores no es posible hasta la trama $n+12$, tal y como se ilustra en el diagrama. No se precisa el envío de ACK/NACKs para confirmar la recepción de paquete en el RS, limitándose éste a la retransmisión de la señalización ACK/NACK.

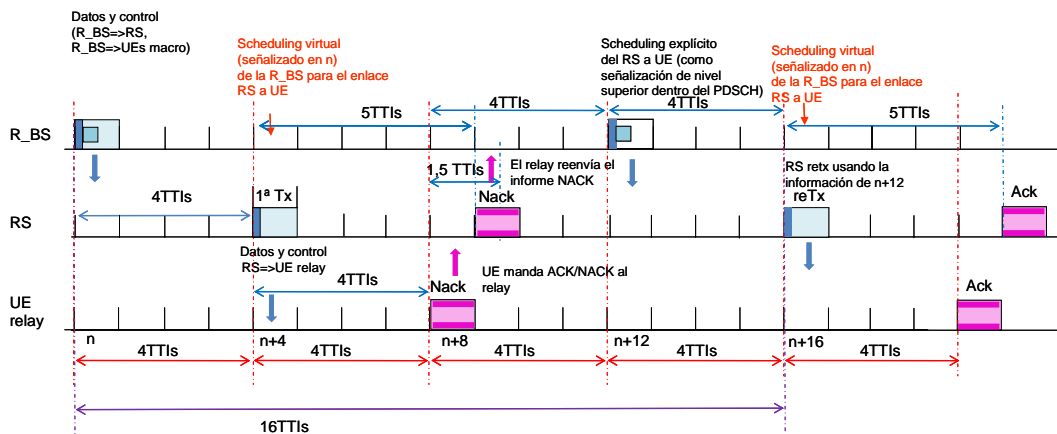


Figura B.42. HARQ extremo a extremo para relay no transparente con scheduling centralizado. Enlace DL

En cualquiera de los casos analizados, el retardo que se experimenta respecto al modo de funcionamiento transparente centralizado es bastante superior debido a la necesidad de un mayor envío de señalización en ambos enlaces.

Analizando el proceso HARQ en el UL, una vez que un UE ha mandado su señalización (en la que se indicará entre otros la calidad de canal CQI y petición de recursos SR) y R_BS le asigna recursos para transmitir siguiendo el procedimiento descrito para el DL, se enviará un paquete en sentido ascendente que será decodificado por el relay al cabo de 4 subtramas. El proceso, al igual que en el DL depende de si el HARQ se implementa nodo a nodo o extremo a extremo, de si es síncrono o asíncrono, etc.

La Figura B.43 ilustra el proceso para un HARQ nodo a nodo en el enlace ascendente. Si el paquete es correcto, el RS procede a la retransmisión hacia la R_BS de los datos en el R-PUSCH (de acuerdo con las indicaciones del R-PDCCH). Al mismo tiempo procede al envío hacia el UE, en el AR-PUCCH, del ACK correspondiente. En caso de error, el RS se lo comunica a la R_BS ya que el *scheduling* es centralizado, para que sea ella quien gestione los nuevos recursos y formato para la retransmisión de los datos dirigidos hacia el UE relay cuya transmisión falló. Una vez R_BS recibe NACK, tarda 4 TTIs en enviar una nueva indicación de *scheduling* (que será reenviada por el RS hacia el UE), lo cual demora enormemente el proceso de recuperación de errores, tal y como se ilustra en la Figura B.43. No obstante, si el HARQ es síncrono/no adaptativo, todo este proceso puede ser obviado y el RS envía directamente un NACK al UE para que éste mande de nuevo el paquete, tal y como se ilustra en la Figura B.44, reduciendo con ello considerablemente el retardo del HARQ.

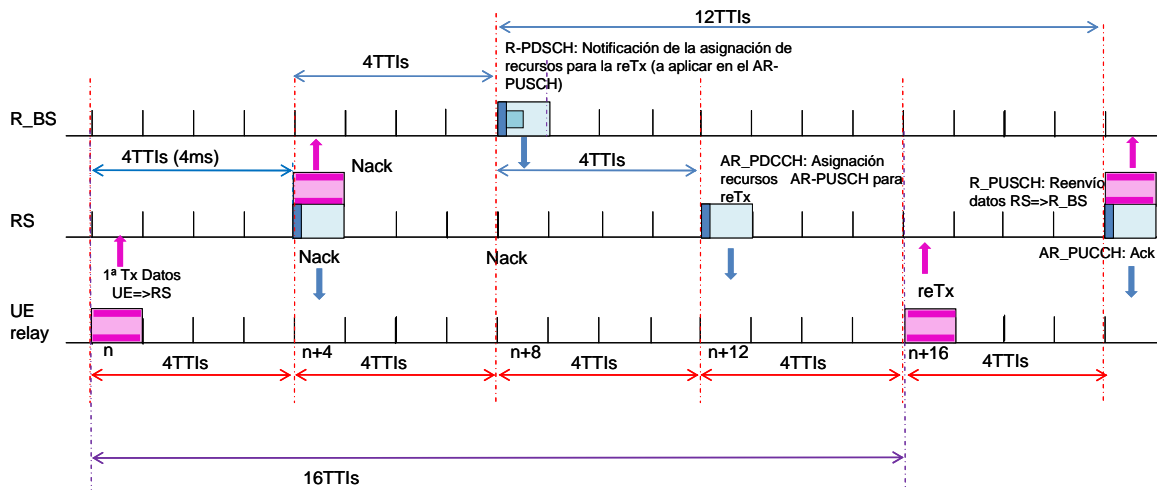


Figura B.43. HARQ síncrono/ adaptativo nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Enlace UL

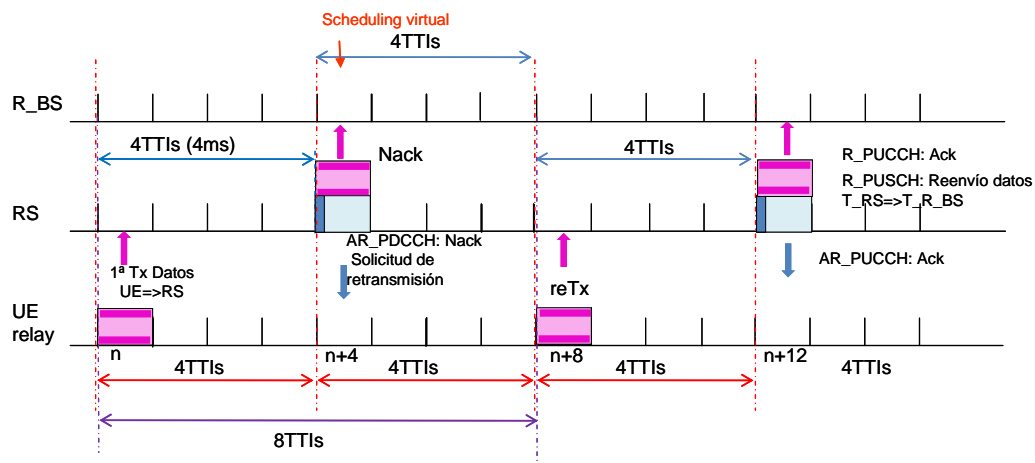


Figura B.44. HARQ síncrono/no-adaptativo nodo a nodo para relay no transparente con scheduling centralizado. Enlace UL

En el caso de aplicar un HARQ extremo a extremo, el proceso sería similar al contemplado en la Figura B.43, con la salvedad de que el relay no genera notificaciones ACK/NACK dirigidas hacia el UE (en el subtrama $n+4$), sino que se limita a encaminar las generadas por la R_BS. En ese caso RS encamina los datos hacia la R_BS en la subtrama $n+4$.

Scheduling distribuido

En el caso de aplicar un *scheduling* distribuido, los relays son quienes efectúan el *scheduling* y deciden los recursos asignados a cada UE y el esquema de MCS. En realidad, la R_BS asigna recursos a los RS de forma semi-persistente y a los UEs macro, y posteriormente el RS asigna los recursos a los UEs que dependen de él. El *scheduling* distribuido 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. No obstante, la flexibilidad en el *scheduling* se restringe a los recursos preasignados al RS. A diferencia del *scheduling* centralizado, el UE sólo precisa enviar información sobre el estado del canal al RS y no es necesario que el RS reenvíe la información de señalización HARQ del enlace de acceso al relay en el enlace *backhaul*, consiguiendo con ello un servicio más rápido a costa de la mayor complejidad que supone el diseño de este tipo de nodos relay.

En la Figura B.45 se ilustra la temporización de un proceso HARQ nodo a nodo para el enlace descendente. Al igual que en el caso de *scheduling* centralizado es posible considerar la aplicación de HARQ extremo a extremo o nodo a nodo, no obstante, la aplicación del primero es poco atractiva por lo que se elude su implementación, ya que una de las principales ventajas del *scheduling distribuido* es la capacidad de manejar las transmisiones más rápidamente aprovechando directamente la unión entre los nodos RS y UE sin la necesidad de comunicación a la R_BS.

La R_BS transmite un paquete hacia un UE, y al cabo de 4TTIs ya puede ser retransmitido por el relay con la información de control pertinente. Transcurridas 4 subtramas el usuario será capaz de señalar HARQ al relay, que en caso de que haya recibido un *report* negativo puede proceder a la retransmisión tras pasar otros 4TTIs. En este proceso la estación base no se ve implicada ya que aunque HARQ sea adaptativo y requiera de una nueva decisión de *scheduling* para las retransmisiones es el propio relay quien se encarga de ello. El mapeado de ACK/NACK en todos los enlaces se puede efectuar de forma implícita en función de los RBs, de forma análoga a los procedimientos descritos para el caso centralizado, dependiendo de si el transporte en el *backhaul* es agregado o no.

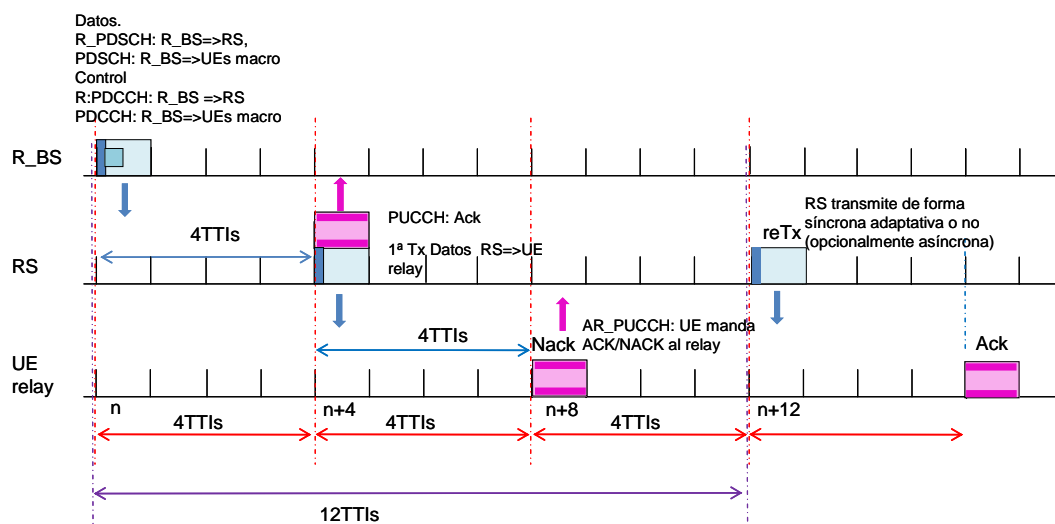


Figura B.45. Ejemplo de modo de funcionamiento HARQ sincrono en relay no transparente y scheduling distribuido en el DL

De manera análoga, en la Figura B.46 se ilustra la temporización de un proceso HARQ nodo a nodo para el enlace ascendente.

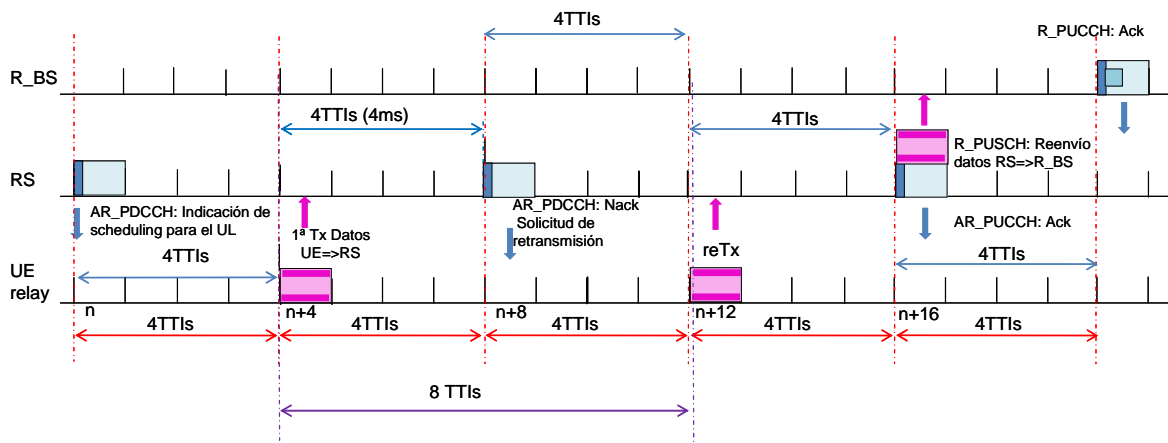


Figura B.46. Ejemplo de modo de funcionamiento HARQ síncrono en relay no transparente y scheduling distribuido en el UL

En el modo no transparente, ya que el relay es capaz de enviar y recibir la información de control, lo más lógico es la implementación de un *scheduling* de tipo distribuido, pues con el centralizado se desemboca en una situación de mayores retardos debido a las múltiples señalizaciones que deben producirse en el enlace *backhaul* y no se aprovecha la capacidad del relay de actuar, a ojos del usuario, como una estación base con autonomía propia de efectuar las funciones propias de la misma.

En cualquier caso, en todos los esquemas vistos hasta el momento, puede producirse un reajuste de las temporizaciones de los procesos de reconocimiento y reenvío a fin de adaptarse a la disponibilidad de recursos (subtramas blancas).

Modo duplexado FD

En este apartado se analizan las implicaciones de la existencia de dos cadenas RF para Tx y Rx tanto en el UL como en el DL. La más directa, como ya se comentó en el caso de relay transparentes, es la ausencia de huecos para la conmutación entre modo Tx y Rx, lo que permite un incremento de *throughput*. Con esta salvedad, el esquema de mapeado que se propone es el mismo que el ilustrado en la Figura B.38. Todas las subtramas pueden ser utilizadas en ambos enlaces (*backhaul* y acceso) con la única restricción de que el *scheduling* debe asegurar que los RBs utilizados para transmitir en el enlace de acceso al relay, dentro de una subtrama, no coincidan con los RBs utilizados en el enlace *backhaul*, a no ser que el nivel de interferencias permita el reúso frecuencial. La mayor libertad en el *scheduler* permite reducir el tiempo de los procesos HARQ.

Desde el punto de vista del mapeado de los procesos HARQ se pueden aplicar los mismos principios que en el duplexado TD, dependiendo de si el transporte es agregado a través de la interfaz radio o no.

Anexo C:

Escenario de evaluación

En este anexo se incluyen las condiciones del escenario sobre el que se han efectuado las simulaciones para el estudio experimental de los diferentes algoritmos de Gestión de Recursos Radio.

C.1. Parámetros de evaluación

Las simulaciones para la comparación de las distintas propuestas de RRM se han implementado sobre una plataforma de evaluación programada en C++, sobre la que se han incorporado los nuevos nodos relay, y toda la funcionalidad asociada a la comunicación con dichos dispositivos. Los parámetros generales del sistema utilizados en la simulación, y siguiendo las especificaciones encontradas en la literatura de los trabajos relacionados con esta temática [20], fundamentalmente de fuentes como el 3GPP e IEEE, se recogen en la Tabla C.1.

Parámetros		Suposiciones	
System Layout		19 celdas y 3 sectors/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	R_BS→UE	LOS	$PL_{LOS}(R) = 103.4 + 24.2 \log_{10}(R)$
		NLOS	$PL_{NLOS}(R) = 131.1 + 42.8 \log_{10}(R)$

(con R en Kilómetros) Cobertura exterior de las antenas del relay	R_BS→RS	LOS	$PL_{LOS}(R)=100.7+23.5log10(R)$ Ganancia de 5dB entre la R_BS y los RS bajo su dominio.	
		NLOS	$PL_{NLOS}(R)= 125.2+36.3log10(R)$ Ganancia de 5dB entre la R_BS y los RS bajo su dominio.	
	RS→UE	LOS	$PL_{LOS}(R)=103.8+20.9log10(R)$	
		NLOS	$PL_{NLOS}(R)=145.4+37.5log10(R)$	
	RS→RS	LOS	$PL_{LOS}(R)=100.7+23.5log10(R)$	
		NLOS	$PL_{NLOS}(R)= 125.2+36.3log10(R)$	
Shadowing Desviación estándar (dB) Cobertura exterior de las antenas del relay	R_BS→UE	8dB		
	R_BS→RS	6dB		
	RS→TUE	10dB		
	RS→RS	6dB		
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 (ver Tabla C.4.)	
		3	Pedestrian-A extendido	
		30	Vehicular-A extendido	
		120	Typical Urban extendido	
Modelo del espectro Doppler		Jakes		
Configuraciones de antenna Configuraciones de antenna	R_BS	Ganancia diversidad	Transmisión	3dBi (2 antenas TX, 2 antenas RX por sector)
			Recepción	3dBi (2 antenas TX, 2 antenas RX por sector)
		Ganancia de antena	15dBi	
		Diagrama radiación	Direccional $A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ con $A_m = 20 \text{ dB y } \theta_{3dB} = 70^\circ$	
	RS	Backhaul R_BS↔RS TX/RX	Ganancia diversidad	3dBi 2 antenas (TX/RX half duplex)
			Ganancia de antena	7dBi 2 antenas (TX/RX half duplex)
			Diagrama radiación	Direccional $A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ con $A_m = 20 \text{ dB y } \theta_{3dB} = 70^\circ$
		Enlace acceso relay	Ganancia diversidad	3dBi (2 antenas TX/RX)
			Ganancia de antena	5dBi

		RS↔UE TX/RX	Diagrama radiación	Omnidireccional
	UE	Enlace acceso relay/ enlace macro	Ganancia diversidad	3dBi (2 antenas TX y 2 antenas RX por sector)
			Ganancia antena	0dBi
			Diagrama radiación	Omnidireccional
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		30dBm	
	UE		24dBm	

Tabla C.1. Parámetros generales de las simulaciones

Para el análisis se ha utilizado un total de 90 usuarios por celda distribuidos de manera uniforme en cada uno de los tres sectores de las celdas y en cada una de las zonas concéntricas que resulta de dividir la celda en anillos de diferente radio a la estación base y con una idéntica área de cobertura (Figura C.1).

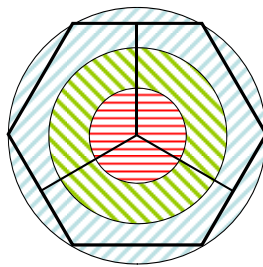


Figura C.1 . Estructura de la celda simulada

La ubicación de las estaciones relay dentro de la arquitectura de la celda es planificada de tal modo que se de cobertura, por parte de los mismos, a los usuarios que se encuentran en el borde de la celda, y que suponen potencialmente, una alta probabilidad de mal enlace con la R_BS. Para ello se implementa un total de seis nodos relay en cada celda, situados en la línea que une la estación base con cada uno de los vértices de la celda (celdas hexagonales), y a una distancia de 2/3 del radio de la celda.

Como se explica en la memoria principal del Trabajo Fin de Máster, la potencia de transmisión de la estación base va a ser de 43dBm a repartir en toda la banda frecuencial y la potencia del relay, tras diferentes pruebas, se establece en 37dBm a repartir entre los RBs que se le van a asignar para dar servicio a sus usuarios. 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*) [21], en el que los usuarios son ordenados mediante una prioridad que busca maximizar la tasa servida en la red, dada por la relación entre el *throughput* instantáneo ($c_{j,k}$) y el promediado ($T_j[n-1]^t$) de cada UE j en el recurso k , y que se calcula de la siguiente manera:

$$P_{j,k}^{PF} = \frac{c_{j,k}[n]}{T_j[n-1]'} \quad \forall j,k \quad (C.1)$$

La Tabla C.2. 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 (16QAM 1/2 / MCS adaptativa)

Tabla C.2. Parámetros dependientes del scheduling y del servicio.

Se utiliza para el conocimiento de la calidad de canal entre cada UE y el R_BS o RS medidas de CQI (*Channel Quality Indicator*) promediadas durante una ventana temporal de duración W_{CQI} , medida utilizada por el *scheduler* tras un retardo temporal de t_{CQI} (Tabla C.3.).

Parámetros	Valores
W_{CQI}	4ms
Δ_{CQI}	1ms
t_{CQI}	2ms

Tabla C.3. Parámetros del modelo de CQIs

Para los desvanecimientos Rayleigh se han aplicado a los modelos extendidos propuestos en E-UTRA y que se muestran a continuación en la Tabla C.4. 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 C.4. Modelos de propagación multicamino

Por último la relación entre las modulaciones utilizadas y la SINR conseguida en un enlace viene incluida en la Tabla C.5. 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 C.5. SINR umbral y tasa de datos para cada MCS

Anexo D:

Simulaciones previas

En este anexo se incluyen las simulaciones realizadas para el estudio de la potencia de transmisión de los relays que resulta adecuada para un funcionamiento del sistema óptimo.

D.1. Resultados de las simulaciones

A continuación se incluye alguna de las pruebas realizadas como paso previo al cálculo de la potencia con la que los relays deben transmitir para un funcionamiento del sistema óptimo. Los datos recogidos en las siguientes tablas (Tabla D.1. - Tabla D.5.) han sido obtenidos con una potencia de transmisión en los relays de 30dBm, y demuestran que éste es un valor demasiado pequeño como para que el número de usuarios a los que las RSs van a dar servicio sea significativo a la hora de obtener beneficios sobre una red de comunicaciones móviles que funciona en modo infraestructura estándar. Así, en el caso de emplear una potencia de transmisión de 30dBm, los UEs problemáticos (de la zona exterior de la celda), que en su mayoría serán servidos por R_BS, sufren unas malas condiciones de canal y además reciben RBs para sus datos de la zona común a todas las celdas, por lo que se incrementa la probabilidad de errores en la transmisión con respecto al caso en que los relays transmiten con más potencia y los usuarios exteriores se enganchan a ellos recibiendo los recursos de una manera coordinada y obteniendo de este modo mejores prestaciones en la red.

		UEs macro		UEs relay	
PF7 (16-QAM ½)	RBs asignados	9		3 x 6RSs=18	
	UEs enganchados	1345		365	
		z0	565	z0	5
		z1	367	z1	203
		z2	413	z2	157
	UEs por entidad	70,79 a cada R_BS		19,21 (a los 6 RSs)	
	Tasa teórica celda	2,16 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,263		0,329	
		z0	0,045	z0	0,209
		z1	0,275	z1	0,188
		z2	0,737	z2	0,540
	Tasa efectiva celda (Mbps)	2,181		3,319	
		z0	1,083	z0	0,052
		z1	0,620	z1	1,945
		z2	0,478	z2	1,322
	Tasa total UEs (Mbps)	(5,5 subtrama normal + 4,362 subtrama backhaul) / 2 = 4,931			

Tabla D.1. Resultados obtenidos para el método PF7, MCS fija 16-QAM ½

		UEs macro		UEs relay	
PF7 "flexible" despliegue 2 (16-QAM ½)	RBs asignados	9		3 x 6RSs=18	
	UEs enganchados	1347		363	
		z0	565	z0	5
		z1	360	z1	200
		z2	782	z2	158
	UEs por entidad	70,89 a cada R_BS		19,1 (a los 6 RSs)	
	Tasa teórica celda	2,16 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,378		2,560	
		z0	0,045	z0	1,685
		z1	0,266	z1	0,765
		z2	0,702	z2	5,063
	Tasa efectiva celda (Mbps)	2,188		3,761	
		z0	1,083	z0	0,057
		z1	0,625	z1	2,186
		z2	0,480	z2	1,518
	Tasa total UEs (Mbps)	(5,919 subtrama normal + 4,376 subtrama backhaul) / 2 = 5,147			

Tabla D.2. Resultados obtenidos para el método PF7 despliegue "flexible", MCS fija 16-QAM ½

		UEs macro		UEs relay	
PF4 despliegue 1 (16-QAM ½)	RBs asignados	18		3 x 6RSs =18	
	UEs enganchados	1346		364	
		z0	565	z0	5
		z1	370	z1	200
		z2	411	z2	159
	UEs por entidad	70,84		19,16	
	Tasa teórica celda	4,32 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,252		5,552	
		z0	0,029	z0	3,956
		z1	0,405	z1	2,460
		z2	0,655	z2	9,935
	Tasa efectiva celda (Mbps)	4,336		3,278	
		z0	2,308	z0	0,048
		z1	1,213	z1	1,946
		z2	0,815	z2	1,284
	Tasa total UEs (Mbps)	(7,614 subtrama normal + 4,336 subtrama backhaul) / 2 = 5,975			

Tabla D.3. Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM ½

		UEs macro		UEs relay	
PF4 despliegue 2 (16-QAM ½)	RBs asignados	18		3 x 6RSs =18	
	UEs enganchados	1346		364	
		z0	565	z0	5
		z1	370	z1	200
		z2	411	z2	159
	UEs por entidad	70,84		19,16	
	Tasa teórica celda	4,32 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,253		5,552	
		z0	0,029	z0	3,955
		z1	0,405	z1	2,460
		z2	0,655	z2	9,935
	Tasa efectiva celda (Mbps)	4,335		3,278	
		z0	2,308	z0	0,048
		z1	1,213	z1	1,946
		z2	0,814	z2	1,284
	Tasa total UEs (Mbps)	(7,613 subtrama normal + 4,335 subtrama backhaul) / 2 = 5,974			

Tabla D.4. Resultados obtenidos para el método PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM ½

PF3 (16-QAM 1/2)	RBs asignados	UEs macro		UEs relay	
		3 x 6RSs = 18		365	
	UEs enganchados	1345		365	
		z0	565	z0	5
		z1	369	z1	201
		z2	411	z2	159
	UEs por entidad	70,79		19,21	
	Tasa teórica celda	5,04 Mbps		4,32 Mbps	
	BLER (%)	0,253		14,634	
		z0	0,033	z0	1,768
		z1	0,348	z1	5,321
		z2	0,765	z2	30,412
	Tasa efectiva celda (Mbps)	5,045		2,974	
		z0	2,745	z0	0,052
		z1	1,388	z1	2,017
		z2	0,912	z2	0,904
	Tasa total UEs (Mbps)	(8,019 subtrama normal + 4,324 subtrama backhaul) / 2 = 6,171			

Tabla D.5. Resultados obtenidos para el método PF3, MCS fija 16-QAM 1/2

A continuación se representan en las Figura D.1 - Figura D.5 los valores de SINR obtenidos en los usuarios, tanto en los servidos por la estación base como por los relays, para cada uno de los métodos propuestos.

Aunque los valores de SINR en los UEs macro son similares a los obtenidos con las pruebas finales en las que los RSs transmiten con una potencia de 37dBm, y los valores de SINR en los UEs relay son incluso mejores, ya que es su mayoría los UEs exteriores o no son servidos por relays o quedan bloqueados en la red, el número de subscriptores que puede recibir servicio es mucho menor y la probabilidad de error en la comunicación es superior, por lo que se desecha esta opción y se decide aumentar la potencia de transmisión de los relays con objeto de que sean capaces de servir a un mayor número de UEs.

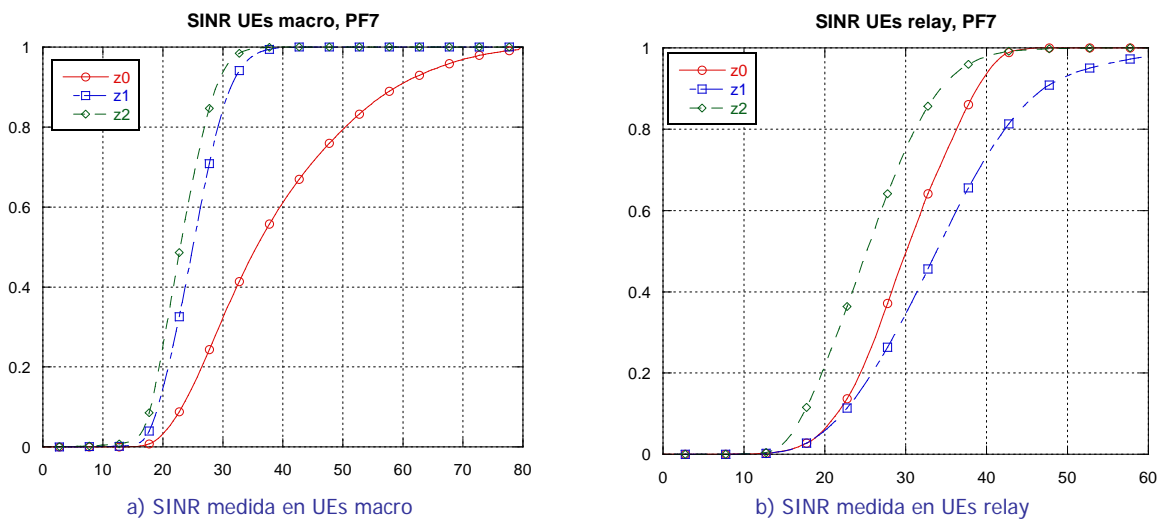


Figura D.1 . SINR obtenida en PF7 despliegue 1, MCS fija 16-QAM 1/2

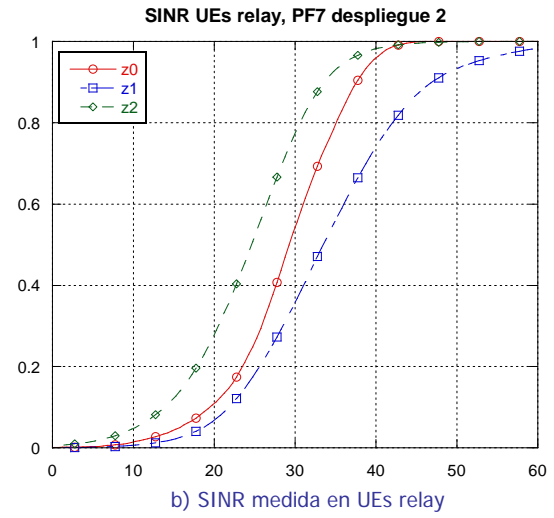
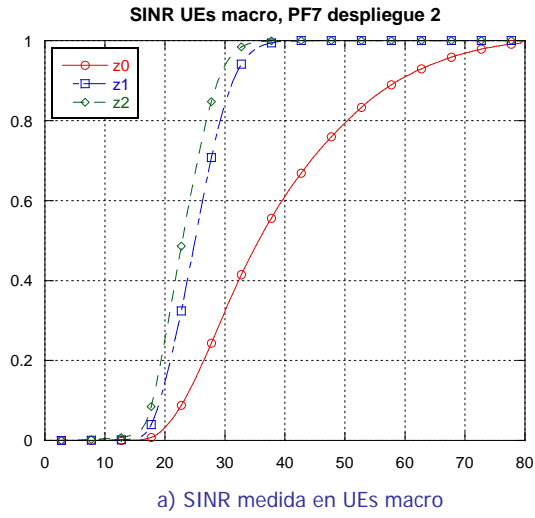


Figura D.2 . SINR obtenida en PF7 despliegue 2, MCS fija 16-QAM 1/2

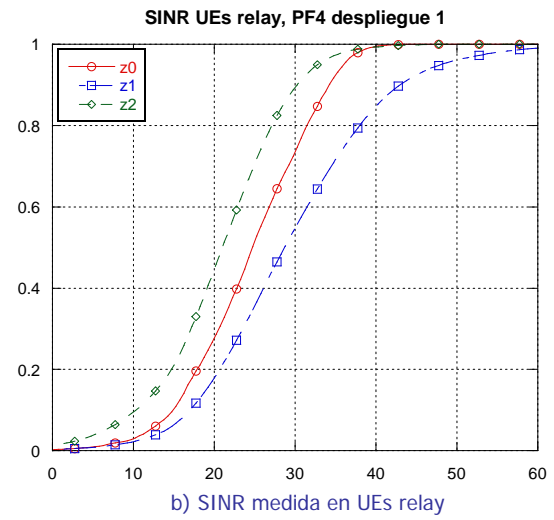
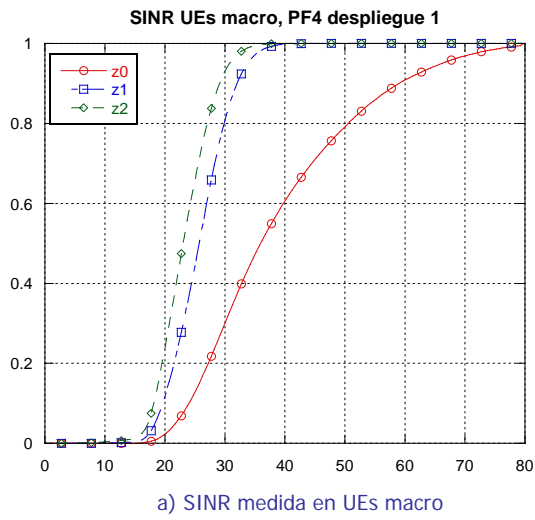


Figura D.3 . SINR obtenida en PF4 despliegue 1, MCS fija 16-QAM 1/2

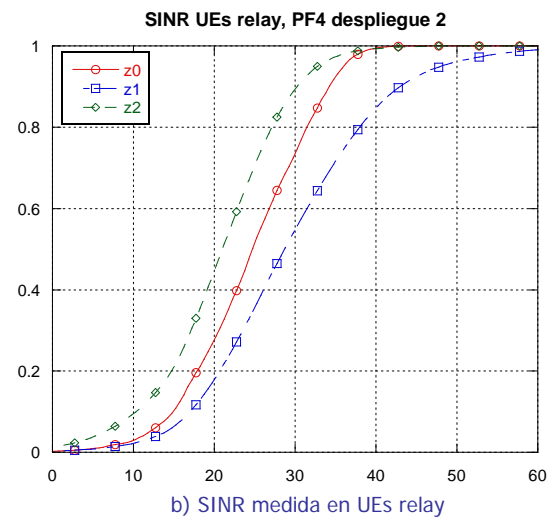
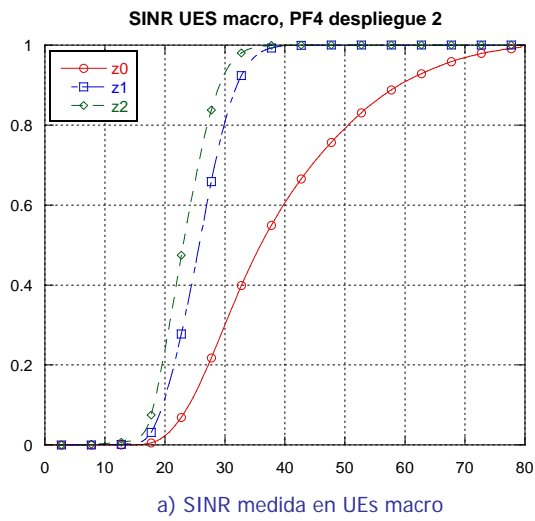


Figura D.4 . SINR obtenida en PF4 despliegue 2, MCS fija 16-QAM 1/2

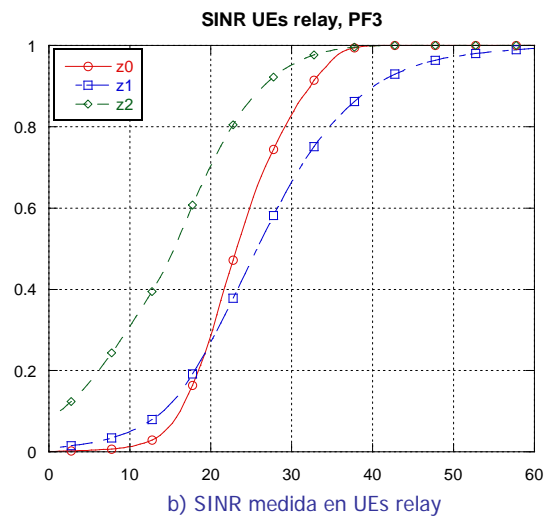
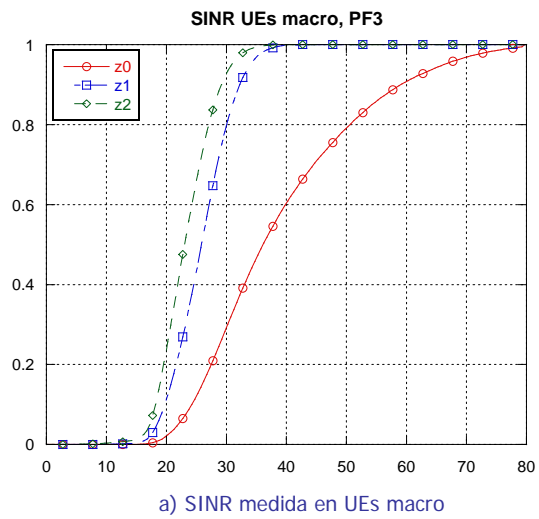


Figura D.5 . SINR obtenida en PF3, MCS fija 16-QAM 1/2

