



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: QoS – Control de Admisión Uplink en Long Term Evolution

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica Telecomunicación, especialidad Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: Sergi Ramon Ferran

DIRECTORA: Maria Ángel Lema Rosas

CODIRECTOR: Mario García Lozano

FECHA: 6 de febrero de 2012

Título: QoS - Control de admisión del Enlace Ascendente en Long Term Evolution

Autor: Sergi Ramon Ferran

Directora: Maria Ángel Lema Rosas

Codirector: Mario García Lozano

Fecha: 6 de febrero de 2012

Resumen

Long Term Evolution (LTE) es una tecnología de comunicación móvil que permite garantizar tanto la alta demanda de transmisión de datos requerida en la actualidad como la calidad del servicio ofrecido, para ello se sirve de un conjunto de funcionalidades que gestionan los recursos radio disponibles.

Una de estas funcionalidades es el control de admisión de usuarios, el cual regula la entrada de usuarios en función de la calidad de servicio requerida por este usuario que desea conectarse y de la calidad de servicio requerida por todos los usuarios ya conectados a la base.

Este proyecto parte de un simulador LTE creado en el lenguaje de programación C# que dispone de todas las funcionalidades RRM excepto el AC. A causa de ello, todos los usuarios están conectados y transmiten información durante toda la simulación.

Por lo tanto, con el objetivo de implementar el control de admisión se han modificado tanto las funcionalidades de gestión de recursos radio como los usuarios conectados al sistema, a los cuales se les evaluará ciertas condiciones de transmisión como la cantidad de datos que poseen en el buffer o la tasa binaria garantizada.

En el proyecto también se ha implementado un gestor de recursos que permita la estimación del canal a un gran número de usuarios.

Title: QoS - Control de admisión del Enlace Ascendente en Long Term Evolution

Author: Sergi Ramon Ferran

Directora: Maria Ángel Lema Rosas

Co-director: Mario García Lozano

Date: February, 6th 2012

Overview

Long Term Evolution (LTE) is a mobile communication technology which ensures the high demand for data currently required and the quality of the service, for that it uses a set of capabilities that manage radio resources available.

One of these features is the user admission control, which regulates the entry of users based on the quality of service required by the user to connect and quality of service required by all users already connected to the base.

This project is part of an LTE simulator created in the programming language C# that has all the features RRM included except the AC. As a result, all users are connected and transmit information throughout the simulation.

Therefore, in order to implement the admission control have changed the functionality of radio resource management and users connected to the system, which will be tested transmission conditions as the amount of data held in the buffer or guaranteed bit rate.

The project has also implemented a resource manager for the estimation of the channel to a large number of users.

A la meva família per aguantar-me durant els últims 21 anys.

Als companys d'universitat, perquè sense ells no hagués arribat fins aquí o, com a mínim, no hagués sigut tant divertit arribar-hi: Balbo, Sandi, Joaka i Gasull.

A tota la gent que m'ha aguantat els últims 6 mesos que han estat tant durs: Jonathan, Joan M., Sonia, Joan N., H, Natalia, Isaac, Jose i la resta.

També agrair a la universitat i al departament de Teoria del Senyal i Comunicacions per prestar-me un lloc on fer el TFC i a tota la gent del departament que m'ha ajudat durant la realització d'aquest projecte.

I, per descomptat, a la Maria per tot el treball i esforç que ha tingut que fer per aquest TFC, que no ha sigut pas poc.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. LONG TERM EVOLUTION (LTE).....	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Especificaciones LTE.....	7
1.3. Tecnologías OFDMA y SC-FDMA.....	8
1.3.1. OFDMA.....	8
1.3.2. SC-FDMA.....	9
1.4. Calidad de Servicio en LTE: Definición del problema.....	10
CAPÍTULO 2. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO (RRM).....	13
2.1. Definición de los recursos radio en LTE Uplink.....	13
2.2. Información sobre el estado del canal (CSI).....	14
2.3. Adaptación al enlace o Link Adaption (LA).....	16
2.4. Control de potencia (CP).....	17
2.5. Unidad de control de errores (HARQ).....	18
2.6. Asignación de recursos radio (PS).....	18
2.6.1. Buffer Status Report (BSR) y Scheduling Request(SR).....	19
2.6.2. Asignación de recursos.....	20
2.7. Calidad de servicio y control de admisión asignación de recursos radio (PS) ..	21
2.7.1. Calidad del servicio (QoS).....	21
2.7.2. Algoritmos de control de admisión.....	22
CAPÍTULO 3. SIMULADOR BASADO EN LTE.....	26
3.1. Introducción.....	26
3.2. Estructura del simulador.....	26
3.2.1. Escenario.....	27
3.2.2. Píxeles y modelo de propagación.....	28
3.3. Clase CSI.....	29
3.4. Herramienta software.....	29
3.4.1. Información sobre el estado del canal en el simulador.....	30
3.4.2. Asignación de modos de transmisión en el simulador.....	34
3.4.3. Control de potencia en el simulador.....	34
3.4.4. Unidad de control de errores en el simulador.....	35
3.4.5. Asignación de recursos radio en el simulador.....	35
3.5. Control de admisión en el simulador.....	37
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	40
4.1. Valoración de resultados.....	41
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	48
5.1 Conclusiones del trabajo.....	48
5.2 Valoración personal.....	48

5.3	Trabajos futuros.....	49
5.4	Estudio ambiental.....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	50

INTRODUCCIÓN

Con una demanda continuamente creciente de comunicaciones a alta velocidad, 3GPP *Long Term Evolution* (LTE) se presenta como una de las soluciones más adecuadas para la nueva generación de comunicaciones móviles. Este incremento de usuarios seguirá la misma tendencia durante los próximos años, elevando el número de suscripciones de datos a nivel mundial. Estos nuevos usuarios han de ser satisfechos en sus comunicaciones tal y como lo han sido con estándares anteriores. Para ello, LTE introduce el concepto de *Evolved Packet System* (EPS) *bearer*, en el cual se define una calidad de servicio (QoS) común al flujo de paquetes en la comunicación de extremo a extremo.

LTE ofrece la capacidad de transmitir a altas velocidades debido a las modulaciones multiportadora tanto del enlace descendente, *downlink* (DL), *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) como del ascendente, *uplink* (UL), *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA); las cuales presentan una mayor robustez a las interferencias y mejoran la eficiencia espectral. Por otro lado, en LTE, todas las operaciones de gestión de recursos radio se efectúan en la estación base, o *evolved-NodeB* (eNB). Por tal de poder satisfacer la QoS de los usuarios conectados a la celda, el eNB regula la entrada de usuarios en el sistema en función de si la QoS que requiere el usuario puede ser satisfecha, mediante un algoritmo de control de admisión (AC).

Para tomar la decisión de la admisión o no de un usuario al sistema, el eNB debe estimar los requerimientos radio de este usuario, esto es, la cantidad de recursos que requerirá para el cumplimiento de su QoS. Esta estimación del canal de comunicaciones en el UL puede llevarse a cabo mediante las *Sounding Reference Singals* (SRS), señales enviadas desde el móvil a la base a lo largo de todo el ancho de banda del sistema.

El objetivo de este TFC es estudiar un algoritmo de AC que permita gestionar la entrada de usuarios al sistema en función del QoS, estimando los requerimientos de cada usuario mediante las SRS. Para ello es necesario diseñar, también, un algoritmo de asignación de recursos de sondeo, que servirá de apoyo para la admisión de usuarios al sistema y también para la asignación de recursos para la transmisión de datos.

Para llevar a cabo el estudio del funcionamiento de los algoritmos diseñados, se utilizará una herramienta de simulación a nivel de sistema creada en el lenguaje de programación C#. La herramienta de simulación dispone de todas las funcionalidades RRM excepto el AC y un algoritmo de asignación de recursos de sondeo evolucionado.

El documento se organiza de la siguiente manera:

- En el primer capítulo se explica la evolución de las redes de comunicación móvil para alcanzar la tecnología LTE, así como las especificaciones técnicas y la tecnología usada este sistema. En este capítulo se detalla también la definición del problema.
- El segundo capítulo se centra en la gestión de los recursos radio (RRM) que realiza el sistema LTE a través del control de potencia, la unidad de control de errores, la asignación de los recursos y del modo de transmisión, la información del estado del canal y el control de admisión.
- El capítulo tercero se introduce la herramienta de simulación utilizada en el proyecto y los bloques RRM que lo conforman. En este capítulo también se explican las modificaciones realizadas en el simulador para permitir la implementación de un control de admisión en el programa.
- En el cuarto capítulo se evalúa el funcionamiento de los bloques implementados en el sistema a través de los *outputs* obtenidos en las simulaciones.

Finalmente, para concluir con el documento, se presentan las conclusiones extraídas seguidas de unas líneas de trabajo futuro.

CAPÍTULO 1. LONG TERM EVOLUTION (LTE)

Las tendencias de comunicación de hoy en día se trasladan a la rápida transmisión de datos a través del teléfono móvil. Sin embargo, esta tipo de comunicación ha evolucionado desde la más tradicional comunicación de voz. En este capítulo se explica qué es la tecnología *Long Term Evolution* (LTE), las razones de su creación y el proceso que han experimentado las redes de comunicaciones móviles hasta alcanzar este punto. De este modo, también se recogen las especificaciones técnicas del sistema LTE y las tecnologías utilizadas para el acceso a la red.

1.1. Introducción

El incremento del número de usuarios de telefonía móvil junto al aumento de servicios que requieren de una gran cantidad de datos para funcionar correctamente ha creado la necesidad de incrementar la velocidad de transmisión de los sistemas móviles. Estos servicios, que pueden englobar desde archivos de gran tamaño que tienen que ser descargados a servicios que requieren transmisión y recepción de información continuamente han producido un gran aumento de la cantidad de datos requeridos por los usuarios [1]. En la figura 1.1 se muestra el aumento previamente mencionado mediante una gráfica que refleja el aumento de la carga en las transmisiones de paquetes voz respecto a las transmisiones de paquetes de datos [2].

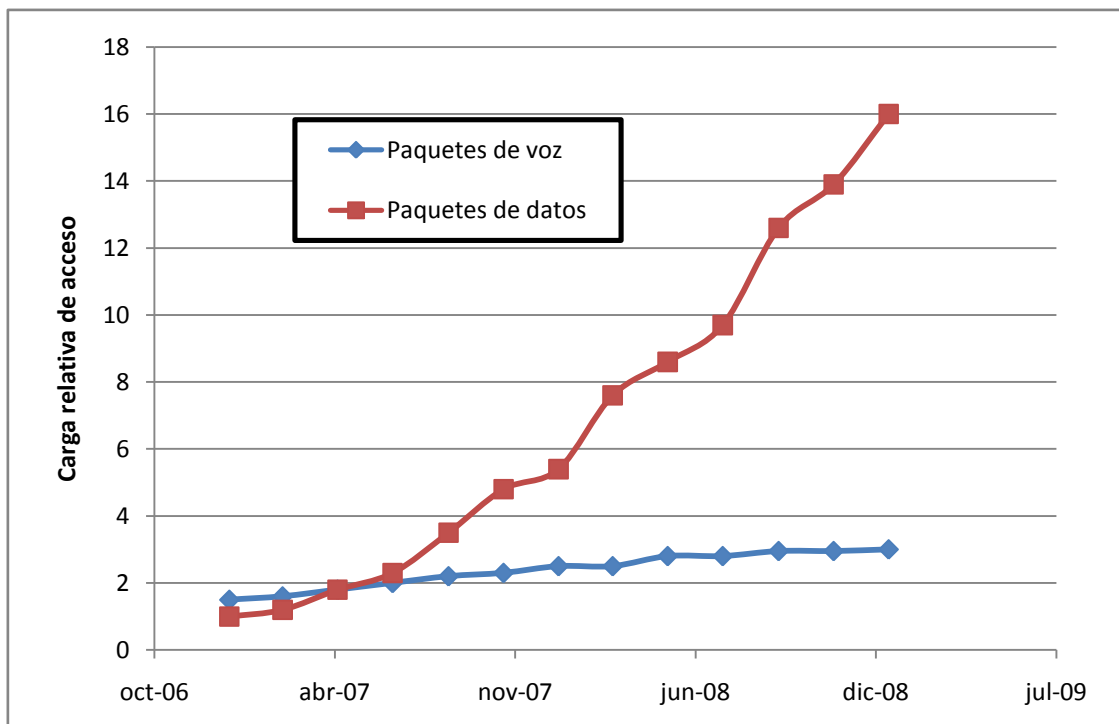


Fig. 1.1 Carga en la red provocada por los servidores de voz y datos [2].

Pese a que tanto los servicios de telefonía móvil como de telefonía fija empezaron ofreciendo servicios de voz, la carga de este último en el sistema se estancó con el paso de los años. En cambio, la demanda de los servicios de datos ha crecido de manera exponencial, pasando de cargar la red al mismo nivel que los servicios de voz a quintuplicar la carga de estos servicios. Por otro lado, la aceptación de teléfonos inteligentes (móviles que requieren de una conexión continua a Internet para su correcto funcionamiento) entre la población ha producido un aumento de usuarios suscritos a distintas tarifas de datos. El aumento es tal que se calcula que el número de suscriptores a este tipo de tarifa en el 2014 será de 3,4 miles de millones de abonados, es decir, en el 2014 alrededor de un 80% de los propietarios de un teléfono móvil estarán suscritos a una tarifa de datos [2].

En la figura 1.2, se puede observar el crecimiento exponencial de suscripciones de tarifas de banda ancha móvil y el estancamiento que se ha producido en el número de suscripciones de ancho de banda fijo. Esta progresión a lo largo de los años provoca que se haya cuadruplicado la diferencia entre ambas suscripciones [2].

Para soportar este aumento en la transmisión datos, tanto de subida como de bajada, los sistemas de telefonía móvil se han visto obligados a evolucionar y, con ello, se han definido nuevos sistemas que pudieran abastecer las necesidades de estos teléfonos móviles.

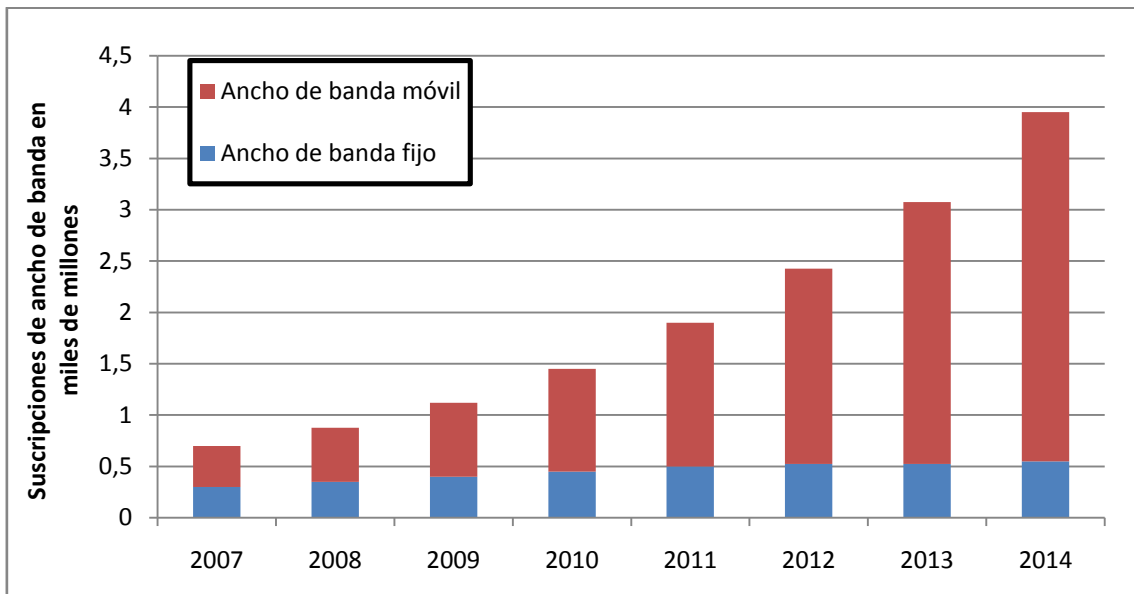


Fig. 1.2 Aumento de las suscripciones de ancho de banda fijo y móvil [2].

La tecnología *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) marca el inicio de la tercera generación (3G) de teléfonos móviles. Esta generación tiene como principal objetivo abastecer la demanda de transmisión de datos de una manera robusta, cumpliendo con una requerida calidad del servicio (QoS). Por QoS entendemos los requerimientos que se han de cumplir en todos los aspectos de la conexión como puede ser la velocidad de transmisión, la pérdida de paquetes o el retardo máximo. Los parámetros de QoS son naturales de cada servicio, como puede ser Voz sobre IP (VoIP) o vídeo sobre demanda. En el capítulo 2 se explicará este tema más detalladamente.

La tecnología UMTS fue creada por el foro *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), este foro 3GPP está compuesto por diversas organizaciones normativas y tiene como objetivo definir las especificaciones a nivel mundial del 3G. Para ello, ha ido renovando los estándares del sistema con actualizaciones llamadas *releases*. Dentro de los documentos que se han creado por parte del 3GPP destacan [1]:

- **Release 99:** La primera versión del sistema UMTS tiene como principal característica el reuso de la red existente de las tecnologías de comunicación móvil anteriores a UMTS como son *General Packet Radio Service* (GPRS) y *Global System for Mobile* (GSM). También se introduce la tecnología *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) de acceso a la red.
- **Release 4:** La mejora más importante es la introducción de una nueva arquitectura de conmutación de circuitos.
- **Release 5:** Introduce la tecnología *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) en UMTS que permite una tasa pico en enlace descendente o *downlink* de 14,4 Mbps y permite la realización de comunicaciones multimedia en terminales móviles.
- **Release 6:** Incorpora el *High-Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) al sistema.
- **Release 7:** Mejora la calidad de servicios y aplicaciones y disminuye la latencia. Desarrollo de *High-Speed Uplink Packet Access +* (HSPA+).
- **Release 8:** Se lanza LTE. Las características propias de esta tecnología están definidas en el apartado 1.2.

La evolución de los sistemas de comunicaciones móviles es debida a una necesidad de aumento de la capacidad. Con LTE, se encuentra una solución para cubrir la creciente demanda de tráfico y además se presenta como la unión entre la actual 3G y la cuarta generación (4G) de comunicaciones móviles. Por esto se denomina coloquialmente como 3.9G. LTE permite, también, aprovechar en gran medida las tecnologías creadas en generaciones anteriores, de manera que se facilita su implementación y se reduce cuantiosamente el precio de implementación en las redes existentes [2]. Dicha evolución de estándares de comunicaciones se resume de manera gráfica en la Figura 1.3.

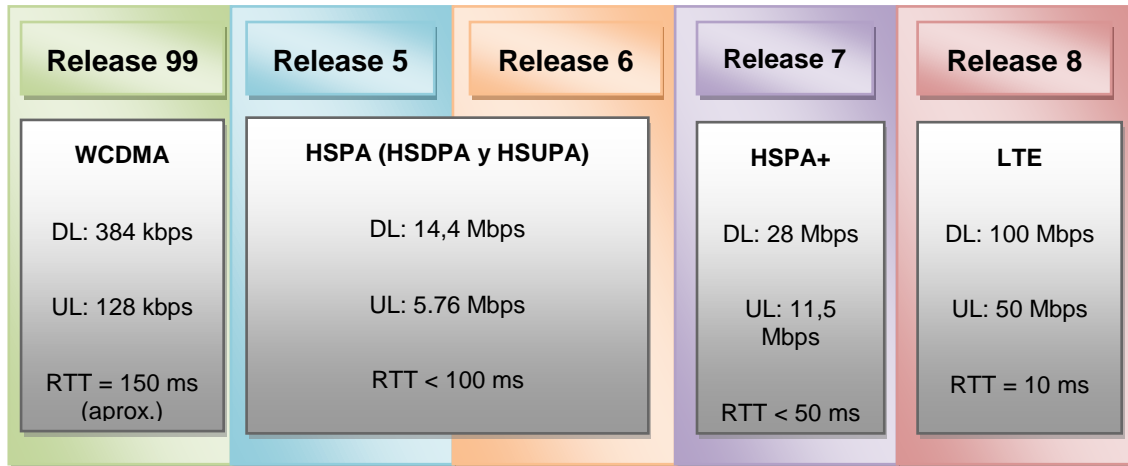


Fig. 1.3 Evolución de 3G en función de sus *releases* [1].

En resumen, la evolución creciente que se ha producido en la demanda de los servicios de datos también se ha producido en las tecnologías que ofertan dichos servicios. Alcanzando con LTE un sistema que permita juntar la generación actual con el futuro de las tecnologías de transmisión de datos móvil. La progresión de la demanda y los servicios ofertados se hacen presentes en el aumento de la velocidad ofrecida por los operadores, tanto en enlace ascendente o *uplink* (UL) como en enlace descendente o *downlink* (DL). Si se comparan los valores de velocidad de transmisión de datos en enlace descendente entre LTE y los primeros sistemas de transmisión de datos se ha mejorado un 10000%. Y solo la evolución del sistema UMTS ha provocado que los valores de descarga se hayan decuplicado. La relación entre los distintos sistemas de comunicación móvil y su velocidad de transmisión de datos se pueden encontrar en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Velocidad máxima de transmisión de datos en enlace descendente según la tecnología utilizada.

Sistema de comunicación	Velocidad de transmisión de datos (DL)
GSM	9,6 kbps
GPRS	21,4 kbps
HSPA	14,4 Mbps
HSPA+	28 Mbps
LTE	100 Mbps

1.2. Especificaciones LTE

Para la tecnología LTE, el 3GPP marcó unos requerimientos exigentes a las tecnologías de acceso con el principal objetivo de que estas evolucionaran. Estos requerimientos, en resumen, son:

- Reducción de los retardos de transmisión: Retardos en establecimiento de conexión y latencia.
- Incrementar la tasa de datos de los usuarios: La velocidad de datos objetivo es de 100 Mbps en el DL y 50 Mbps en el UL, en un ancho de banda de 20 MHz.
- Ancho de banda escalable: Deben soportarse anchos de banda de 20, 15, 10, 5, 3 y 1.4 MHz.
- Posibilidad de uso de banda pareada (modo FDD) y no pareada (TDD)
- Mejorar la tasa de datos de los usuarios en el límite de la celda, más afectados por las interferencias.
- Reducir el coste por bit, implicando una mejora de la eficiencia espectral.
- Arquitectura de red simplificada.
- Consumo de potencia razonable por parte del terminal móvil.
- Mejora de la cobertura.
- Calidad de servicio: Se ha de garantizar calidad de servicio extremo a extremo. El servicio de Voz sobre IP (VoIP) debe soportarse con las mismas prestaciones con las que se ofrece un servicio de voz para conmutación de circuitos.

Dados estos requerimientos, se entiende que el funcionamiento ofrecido por el sistema LTE ha de ser claramente superior al existente en las redes 3GPP basadas en HSPA. Para hacer posible muchas de las especificaciones, tales como la velocidad de transmisión y eficiencia espectral, LTE introduce tecnologías de acceso multiportadora, las cuales proporcionan ortogonalidad entre usuarios, reduciendo las interferencias y mejorando la capacidad de la red.

La asignación de recursos en el dominio de la frecuencia se hace con una resolución de 180 kHz y la mínima unidad de asignación de recursos, denominada *Physical Resource Block* (PRB), tanto para UL como para DL. Así, con la asignación de recursos en el dominio de la frecuencia será posible que LTE incremente la capacidad del sistema.

Sin embargo, esta capacidad también se verá afectada por la arquitectura de la red. En este caso, LTE presenta una solución con una arquitectura de red eficiente, en la cual se mejora la escalabilidad y se reduce la latencia, mediante la reducción de un número de elementos en la red. En el caso de LTE, en el eNodeB (celda o estación base, eNB) se incluyen todos los algoritmos que en la arquitectura de red del *Release 6* formaban parte del *Radio Network Controller*, teniendo así una arquitectura de red más distribuida que en las anteriores tecnologías

1.3. Tecnologías OFDMA y SC-FDMA

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, las tecnologías de acceso utilizadas en LTE hacen posible cumplir con muchos de los requerimientos del sistema. Estas tecnologías de acceso multiportadoras, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access* (OFDMA) en el DL y *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) en el UL, aportan ortogonalidad en ambos enlaces, presentan una gran robustez ante la propagación multicamino y permiten una asignación de recursos ajustada al estado del canal [1].

1.3.1. OFDMA

El acceso múltiple OFDMA está basado en la modulación OFDM, una modulación muy presente en un gran número de servicios de comunicaciones como son *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL), *Digital Video Broadcasting – Terrestrial* (DVB-T), *Wireless Local Area Network* (WLAN) o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) [1].

La motivación principal para utilizar OFDMA en LTE y otros sistemas es debido a que cuenta con las siguientes propiedades [1]:

- Robustez en la propagación multicamino.
- Facilidad de generación o modulación a través de la transformación rápida de Fourier.
- Compatibilidad con las técnicas MIMO.
- Flexibilidad para adaptarse a radiocanales con gran ancho de banda gracias a su ecualización en el dominio de la frecuencia.
- Diversidad frecuencial en sistemas de banda ancha (sistemas de ancho de banda mayor que el ancho de banda de coherencia).
- Despliegue de redes de isofrecuencia que permiten que varios transmisores emitan la misma señal pese a estar separados territorialmente.

El principio básico de OFDM es la división de un flujo de datos de alta velocidad en un número de flujos paralelos y de menor velocidad, cada uno de estos corresponde a una señal de banda estrecha en una subportadora. Los diferentes flujos de banda estrecha se generan en el dominio de la frecuencia y más tarde se combinan para formar el flujo de banda ancha mediante una transformada de Fourier inversa (IFFT). En el caso particular de LTE, las subportadoras están separadas 15 kHz, y esta separación se mantiene en cualquiera de los anchos de banda del sistema [8].

A la señal obtenida a la salida de la IFFT se le añade un prefijo cíclico para conformar el símbolo OFDM. Este prefijo cíclico es, básicamente, un intervalo de guarda que reduce la Interferencia Intersimbólica (ISI). Para este intervalo de guarda se utiliza una repetición de la parte inicial de la señal, de manera que la señal cíclica, al crearse con el filtro conformador sinc, lo sigue siendo.

El acceso múltiple OFDMA aplica los principios de OFDM para que diversos usuarios compartan una misma banda de frecuencias manteniendo la ortogonalidad entre ellos. Para ello, cada usuario utilizará un conjunto de subportadoras para la transmisión, las cuales pueden ser contiguas o no. Este acceso en el enlace descendente permite realizar una asignación de recursos frecuenciales oportunista, que consiste en que, con periodicidad de un TTI se asigne un conjunto de subportadoras al usuario cuyo canal presente la mejor SINR en ese mismo conjunto. La definición de los recursos radio a transmitir, y una profunda explicación de la asignación de recursos radio se explicará más adelante en el capítulo 2, gestión de recursos radio.

1.3.2. SC-FDMA

Uno de los parámetros clave que afecta las comunicaciones móviles es la duración de la batería. Si bien es cierto que el funcionamiento de las baterías mejora con el tiempo, aún es necesario que el terminal móvil utilice la menor cantidad de batería posible. En el terminal, el componente que mayor potencia consume es el amplificador de potencia por lo que interesa que funcione con la mayor eficiencia posible. Las señales con un alto *Pick-to-Average Power Ratio* (PAPR), es decir, señales en las que la variación entre la media de los valores de potencia y la potencia pico es elevada, no utilizan los amplificadores de potencia de manera eficiente.

Por esto, es necesario utilizar un modo de transmisión que tenga un nivel de potencia constante. OFDM no es un buen candidato ya que tiene un alto PAPR, y en el enlace descendente el nivel de potencia no es un problema. Como resultado, LTE utiliza una modulación conocida como SC-FDMA, el cual es un sistema que combina el bajo PAPR ofrecido por sistemas de portadora única y las ventajas del OFDM. De esta manera, se simplifica el transmisor y se mantiene la ortogonalidad, los modos de transmisión TDD y FDD y la compatibilidad con las técnicas MIMO [5].

La tecnología SC-FDMA permite utilizar los mismos bloques de procesamiento que OFDM y la misma asignación de recursos en tiempo y frecuencia. A causa de su naturaleza de portadora única, el SC-FDMA obliga a los usuarios del sistema a transmitir en un conjunto de subportadoras adyacentes [5].

Los símbolos de la modulación se generan igual que en el sistema OFDM, la diferencia es que a estos símbolos se les aplica una FFT seguida de una IFFT. El bloque de señal tiene aspecto de una modulación de portadora única. La duración del bloque de señal y el ancho de banda es igual que en OFDM, sin embargo, en SC-FDMA las subportadoras están correladas, pues en OFDM se modulan de forma independiente. Una vez formado el bloque de señal, se le añade el intervalo de guarda para evitar la interferencia intersimbólica. A causa de su naturaleza de portadora única, el SC-FDMA obliga a los usuarios del sistema a transmitir en un conjunto de subportadoras adyacentes [5].

En resumen, las ventajas del sistema SC-FDMA para el UL, son:

- Transmisiones ortogonales en el UL.
- Buena relación PAPR
- Posibilidad de asignación de recursos igual que el sistema OFDMA

1.4. Calidad de Servicio en LTE: Definición del problema

LTE y el *System Architecture Evolution* (SAE) conforman el sistema evolucionado de paquetes, *Evolved Packet System* (EPS), que introduce el concepto de portadora EPS o *EPS bearer*, que permite enrutar el flujo de datos. En este contexto, un *bearer* identifica los flujos de paquetes a los cuales se les ha definido una determinada QoS. Los parámetros típicamente utilizados para definir QoS suelen ser la tasa binaria garantizada o GBR, el tiempo máximo de envío entre paquetes y la tasa de envío erróneo de paquetes. En LTE existen dos tipos de *bearers* dada su QoS en determinados servicios:

- Servicios con GBR: Son aquellos paquetes que requieren de una velocidad mínima de transmisión. La estación base ha de tener en cuenta este dato a la hora de asignar los recursos mediante un control de admisión que cuantifique los requerimientos del usuario. Dentro de este grupo pueden encontrarse servicios como Voz sobre IP o vídeo sobre demanda.
- Sin velocidad de transmisión garantizada: Típicamente tráfico de internet catalogado como *Best-effort*. Estos paquetes de datos no se les asocia una velocidad de transmisión dada y si la red está sobrecargada pueden ver su velocidad reducida.

En la figura 1.5 se muestran las distintas interfaces que tiene que atravesar un *bearer*. En cada uno de estos interfaces la *EPS bearer* se asocia con un *bearer* con identificador de nivel más bajo, con lo que se requiere un meticuloso registro de la relación entre las distintos *bearers* que forman el mismo *EPS bearer*.

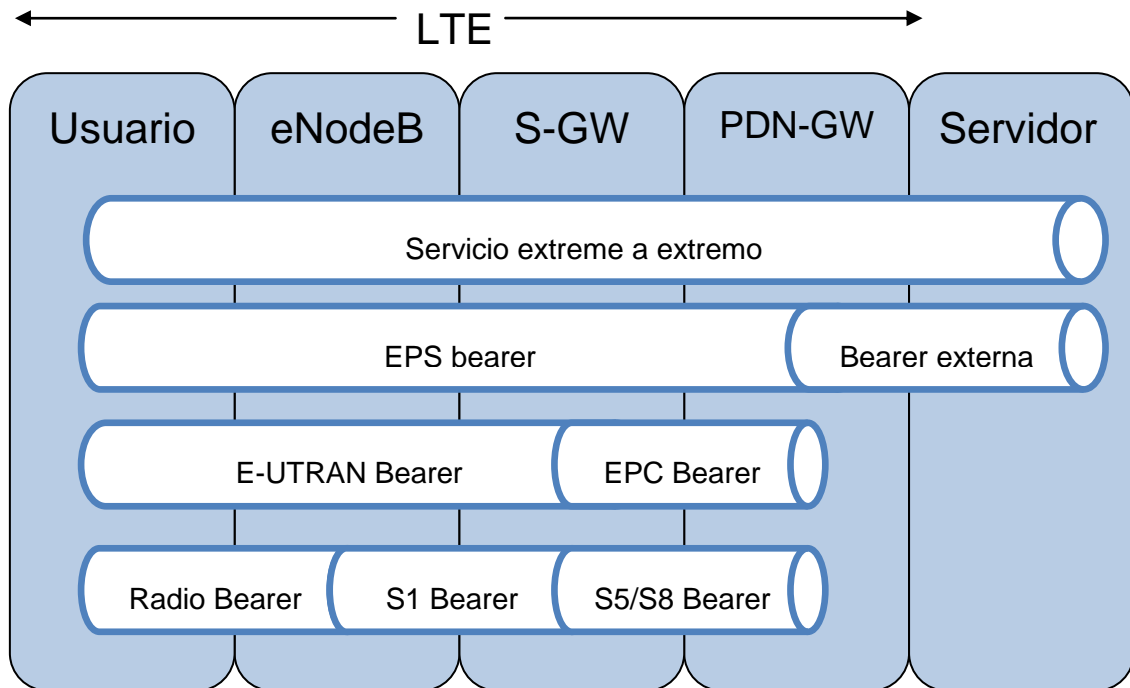


Fig. 1.5 Arquitectura de las capas de servicio de bearers [1].

Como LTE es un sistema distribuido, cada eNB es responsable de satisfacer las necesidades de todos los usuarios que tiene conectados, asegurándose que se cumplimentan las exigencias de los QoS requeridos por cada uno de los usuarios. Para garantizar estas exigencias de QoS y permitir una alta utilización de los recursos radio, es necesaria la implementación de un control de admisión que admita o deniegue las peticiones de nuevos *bearers*.

Esta implementación es indispensable para el correcto funcionamiento del resto de funcionalidades RRM, ya que los recursos a repartir entre los usuarios conectados al eNB son limitados y se asignarán de manera inteligente intentando cumplir todos los QoS requeridos por los usuarios del sistema. Si no se gestiona correctamente la entrada de usuarios, los recursos disponibles no serán suficientes para todos los usuarios conectados y el QoS requerido no se cumplirá. El tiempo que tardará un usuario en realizar la solicitud de entrada al eNB y en ser aceptado o denegado en el sistema será equivalente al *Round-Trip Time* (RTT) entre el usuario y el eNB, el cual será de 8 ms.

Por lo tanto, está claro que es indispensable un AC en LTE para que las funcionalidades RRM trabajen respetando el QoS de los usuarios. Por este motivo se debe implementar un AC en el cual se evalúe las condiciones de cada usuario para admitirlo al sistema.

La evaluación del canal de comunicaciones del usuario y por consiguiente, la estimación de los requerimientos del usuario se efectúan mediante las *Sounding Reference Signals* (SRS). Para asegurar un correcto funcionamiento de las señales de sondeo, en eNB ha de asignarlas de manera inteligente, para asegurarse que la estimación del canal se asemeja al canal real. Para ello, es necesario el estudio de un sistema con dos algoritmos de asignación de recursos. El primero se encargará de la asignación de recursos de sondeo, mientras que el segundo asignará recursos para la transmisión de datos.

Por tanto, como solución al problema del cumplimiento de la QoS en el LTE UL, se presenta:

- Estudio de un algoritmo de AC en el cual se estiman los requerimientos de los usuarios de la celda mediante las señales de sondeo enviadas del usuario a la base.
- Creación de un algoritmo de asignación de recursos de sondeo evolucionado que sea capaz de dar soporte a las tareas del AC de una manera activa, adaptándose a las condiciones del sistema con la evolución del tiempo.

Esta solución se comparará con otra solución más sencilla y de referencia explicada con detalle en el capítulo 2.

CAPÍTULO 2. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO (RRM)

Para poder asegurar QoS a los usuarios es necesario diseñar mecanismos que gestionen de manera eficiente los recursos radio. Para ello es necesario que el eNB haga una repartición inteligente de dichos recursos de tal manera que se asegure la transmisión de la información ajustándose a las necesidades de cada servicio y usuario.

En este capítulo se explica el funcionamiento de la gestión de los recursos radio por parte del eNB, con especial atención en la explicación del control de admisión, siendo éste el principal bloque de investigación de este trabajo.

La gestión de recursos radio, o *Radio Resource Management* (RRM) engloba un amplio rango de técnicas y procedimientos como pueden ser el control de potencia, la asignación de recursos para la transmisión o la admisión de usuarios al sistema. La transmisión en LTE es orientada a paquetes y la asignación de recursos se hace tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia.

2.1. Definición de los recursos radio en LTE Uplink

Los usuarios de LTE comparten recursos tanto temporales como frecuenciales. En el punto de vista temporal, LTE está estructurado en tramas de 10 ms que contienen en cada TTI (1 ms) 14 símbolos SC-FDMA. Un TTI de transmisión está compuesto por dos slots de 7 símbolos SC-FDMA. En el dominio frecuencial, una unidad de transmisión consta de 12 subportadoras. Esta unidad mínima de transmisión se denomina *Physical Resource Block* (PRB) y corresponde a la asignación de dichas 12 subportadoras durante un período de tiempo de 1 ms. Dentro de estos PRBs también se incorporan portadoras de referencia o piloto, en el caso del DL y en el caso de UL, dado que las subportadoras están correladas entre sí, se reservan símbolos SC-FDMA para las portadoras piloto [1].

Al disponer LTE de una arquitectura descentralizada y al estar integradas todas las funcionalidades de la gestión de recursos en el eNB, la interacción entre las distintas funcionalidades es inmediata y, por consiguiente, la toma de decisiones también. Las principales funcionalidades RRM son:

- Información sobre el estado del canal o *Channel State Information* (CSI),
- Adaptación al enlace o *Link Adaptation* (LA),
- Ajuste de potencia o *Power Control* (FPC),
- Asignación de recursos radio o *Packet Scheduler* (PS),
- Control de error o *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ)
- Control de admisión o *Admission Control* (AC)

2.2. Información sobre el estado del canal (CSI)

La asignación de recursos vendrá determinada por las condiciones de transmisión de cada usuario. Para dar a conocer a la estación base el estado del canal de comunicaciones, el sistema LTE utiliza señalización por ambas partes, el terminal y el eNB. En el caso del UL este proceso de señalización se conoce como UL *sounding* y se activa desde el eNB y puede ser simple o periódico. Esta funcionalidad del UL es indispensable para que la mayor parte de las operaciones realizadas por el RRM se realicen de manera precisa, en especial la asignación de recursos radio y la adaptación del enlace o LA [5].

El funcionamiento básico del sondeo comienza por una asignación de ancho de banda de sondeo por parte de la base al terminal, seguido de la transmisión de dicha señal por parte del usuario. Por tanto, el sondeo en el enlace ascendente determina, básicamente, 'cómo y cuándo' se envía una Señal de Referencia de Sondeo (SRS). La SRS es una señal piloto que se transmite en el último símbolo SC-FDMA de la subtrama y que permite obtener información sobre la calidad del canal de enlace ascendente. El sondeo en toda la banda, proporciona la información más completa del canal, pero esto sucede únicamente cuando el terminal se encuentra lo suficientemente cerca del eNB, a medida que el terminal se aleja de este punto y sus pérdidas aumentan, el CSI se degrada.

Los principales problemas que afectan al ancho de banda de sondeo son la limitación en potencia por parte del terminal y el número de usuarios que sondean la misma banda. Existen diversas maneras de multiplexar las señales de sondeo de distintos usuarios de una misma celda, y así asegurar que un número mayor de usuarios consigue transmitir una SRS.

De manera general, las secuencias de las señales de referencia en el LTE UL tienen una función de correlación periódica la cual vale 0 excepto para un incremento 0 de la secuencia. En otras palabras, los incrementos circulares o cíclicos (*cyclic shift*) de una secuencia de señal de referencia son ortogonales entre sí. Esto da a lugar a una manera de derivar múltiples secuencias de una misma señal de referencia, lo cual se utiliza en LTE para multiplexar usuarios [10].

De todos modos las SRS pueden transmitirse desde múltiples terminales multiplexados en diversas dimensiones:

- Tiempo: Las SRS periódicas pueden entrelazarse en diferentes subtramas con distintos *offsets*.
- Frecuencia: Para facilitar el multiplexado en frecuencia los anchos de banda de sondeo siguen una estructura de árbol (véase tabla 2.1), permitiendo crear 8 grupos de 4 anchos de banda siendo el valor más pequeño 4 PRBs.
- *Cyclic Shifts*: hasta 8 pueden ser configurados. De todos modos, para mantener la ortogonalidad entre las diferentes señales estas han de compartir el mismo ancho de banda.
- Peine de transmisión: Hay dos posibilidades de peine de transmisión, se puede transmitir en cada portadora par (si es 0) o impar (si es 1).

Tabla 2.1 Anchos de banda (BW) para el *sounding* según el tipo de configuración.

Configuración ancho de banda de las SRS	Ancho de banda del SRS 0	Ancho de banda del SRS 1	Ancho de banda del SRS 2	Ancho de banda del SRS 3
0	48	24	12	4
1	48	16	8	4
2	40	20	4	4
3	36	12	4	4
4	32	16	8	4
5	24	4	4	4
6	20	4	4	4
7	16	4	4	4

Pese a ello, debido a limitaciones del sistema, la cantidad de usuarios que pueden realizar este *sounding* simultáneo estará limitada [5]. Es una tarea del RRM distribuir los limitados recursos SRS entre los usuarios conectados a la base y así tener información actualizada sobre el estado del canal. Desde el punto de vista de gestión de recursos, los parámetros más importantes de sondeo son [10]:

- Ancho de banda de SRS: determina el ancho de banda de transmisión de una señal SRS.
- Período y retardo temporal: Indica el número de trama en el cual tiene que transmitirse una SRS y la periodicidad de dicha medida.
- Duración: Indica por cuánto tiempo el terminal tiene que enviar dicha señal de SRS.
- Combinación de transmisión: Se refiere a los datos de capa física antes explicados, el *cyclic shift* y el índice de la secuencia.

El sistema de sondeo, por otro lado, presenta también limitaciones. Por un lado, al ser el terminal quien envía la señal repartida a lo largo del ancho de banda, para poder tener una medida fiable es necesario que el ancho de banda de sondeo sea reducido, ya que así la potencia disponible en el terminal quedaría dividida entre un ancho de banda menor. De este modo, para poder sondear todo el ancho de banda del sistema se necesitarán varias transmisiones de SRS. Por tanto, si no se gestiona bien la periodicidad y el ancho de banda de estas medidas, la información sobre el estado del canal puede quedar obsoleta.

Con esta circunstancia presente, los valores estimados de SINR obtenidos del *sounding* no representarán siempre el valor real, sino que serán una estimación hecha por parte del eNB en momentos anteriores. Esto puede llegar a provocar la pérdida de paquetes, ya que se están evaluando valores de SINR que no son actuales. Por lo tanto, la asignación del ancho de banda a sondear debe priorizar las partes del ancho de banda que poseen la medida más antigua.

2.3. Adaptación al enlace o Link Adaptation (LA)

Tal y como se ha mencionado en la anterior sección de este apartado, la información recogida por el CSI manager es útil para muchas operaciones llevadas a cabo en el eNB referentes al RRM. El *Link Adaptation* (LA) se encarga de asignar la modulación y código o *Modulation and Coding Scheme* (MCS) más apropiado para la transmisión de datos en un determinado TTI. Dentro de las posibilidades de combinaciones de modulaciones y códigos, LTE define 27 MCS para asignar a cada usuario en función de la SINR y la *Block Error Rate* (BLER) establecida. La BLER es un indicador que se calcula como la cantidad de paquetes que se han recibido incorrectamente en función del número total de paquetes enviados y que permite evaluar el funcionamiento del sistema.

Una vez recibida la SINR sondeada, el eNB asigna un modo de transmisión para cumplir una BLER determinada, en el caso de este proyecto se ha optado por un valor del 10%. Así, si el canal es de elevada cualidad, con valores altos de SINR, podremos codificar con un valor más grande de MCS, dando mayor eficiencia espectral. En la tabla 2.2 se enumeran los MCSs asociados a la SINR y la BLER establecida. En este caso, dado que se analiza el enlace ascendente, en LTE sólo los terminales de categoría 5 pueden transmitir con una 64-QAM. Dado que no es el caso más general, en este proyecto se ha considerado que la modulación máxima a adquirir es 16-QAM, por esta razón solo 17 códigos restan para la asignación.

Tabla 2.2. Asignación de modulación y codificación según el SINR.

Código	SINR _{min}	Modulación	Codificación
1	-4.7	QPSK	0.12
2	-3.4	QPSK	0.16
3	-2.7	QPSK	0.19
4	-1.7	QPSK	0.25
5	-1	QPSK	0.3
6	0	QPSK	0.37
7	1	QPSK	0.44
8	2	QPSK	0.52
9	2.9	QPSK	0.59
10	3.8	16-QAM	0.67
11	4	16-QAM	0.33
12	4.4	16-QAM	0.37
13	5.4	16-QAM	0.43
14	6.4	16-QAM	0.48
15	7.4	16-QAM	0.54
16	8.2	16-QAM	0.6
17	8.9	16-QAM	0.64

2.4. Control de potencia (CP)

El control de la potencia transmitida en el UL es un factor muy importante cuando se despliega una red de comunicaciones móviles de las características de LTE. No solo es importante por el consumo energético por parte del terminal, también lo es por la gestión de las interferencias intrínsecas al control de potencia. Con el principal objetivo de reducir las interferencias mientras conserva la SINR, LTE introduce la fórmula del control de potencia.

El algoritmo de control de potencia posibilita la compensación parcial de las pérdidas de los usuarios, conocido como control de potencia fraccional o *Fractional Power Control (FPC)*. De este modo, los usuarios con pérdidas más altas transmitirán valores más bajos de potencia y así, generar menos interferencias a las celdas vecinas. De hecho, la fórmula acordada está compuesta por dos partes, la de lazo abierto, *Open Loop Power Control*, establecida por el mismo usuario con parámetros previamente establecidos por el eNB, y otra componente de lazo cerrado, en la cual el eNB establece correcciones sobre el punto de trabajo establecido por el control de potencia de lazo abierto. Dicha fórmula se expresa en la ecuación 2.1:

$$P = \min \{P_{\max}, P_0 + 10\log_{10}N + \alpha L + \Delta_{MCS} + f(\Delta_i)\} [dBm] \quad (2.1)$$

Donde P_{\max} es la potencia máxima de transmisión del usuario, P_0 es un parámetro a la vez específico de la base y del usuario, N el número de PRBs que se le asignan al usuario en el TTI, α es un parámetro específico de la celda y corresponde a la compensación de las pérdidas de cada usuario, L son las pérdidas del usuario medidas en el enlace descendente a partir de la potencia recibida de la señal de referencia, Δ_{MCS} es un parámetro específico que depende del MCS escogido y Δ_i es una corrección de lazo cerrado específica de cada usuario.

Los parámetros más importantes a ajustar son los de lazo abierto, P_0 y α , ya que posibilitan el cumplimiento de la BLER y la SINR requerida. Por un lado P_0 regula la SINR de referencia en el receptor, un aumento en ésta variable provoca un incremento en la potencia total, generando más interferencia intercelular. Sin embargo si P_0 se establece en un punto bajo, la potencia de transmisión puede ser demasiado baja para cumplir con las exigencias de BLER. Por otro lado, el parámetro de compensación de pérdidas fraccional, α , expone al sistema a un compromiso. Por un lado, si la variable es baja, la potencia de transmisión de un usuario en el límite de la celda se verá reducida, por tanto, las interferencias generadas serán inferiores, sin embargo, al mismo tiempo, al reducir su potencia de transmisión lo hará también su velocidad de transmisión, degradando así el límite de la celda. Si se reducen las interferencias en el límite de la celda, la transmisión de datos global crecerá, al precio de perder un correcto funcionamiento de los límites. De esto que el compromiso establecido sea entre la preservación del buen funcionamiento al límite de la celda, o bien la mayor transmisión de datos global.

2.5. Unidad de control de errores (HARQ)

Tal y como se explica en las especificaciones del 3GPP [9] la manera más usual de gestionar los errores de la transmisión es mediante el *Automatic Repeat Request* (ARQ). En el ARQ, el receptor utiliza un código de detección de error para detectar si el paquete recibido contiene errores o no. Si no contiene errores, el receptor envía un reconocimiento positivo, *acknowledgement* (ACK). Del mismo modo, si se detecta un error se envía desde el receptor un mensaje de reconocimiento negativo, NACK. En respuesta al último mensaje el transmisor tiene que enviar otra vez la misma información.

En LTE, sin embargo, se utiliza un modo híbrido entre *Forward Error-correcting Coding* (FEC) y ARQ, conocido como *Hybrid ARQ* (HARQ). Los paquetes erróneos son descartados y se reclama la retransmisión de estos mismos paquetes. En el caso de LTE en el enlace ascendente el HARQ se dice ser síncrono y adaptativo, con lo que la retransmisión puede tener lugar en cualquier punto del ancho de banda del sistema, pero en un TTI específico.

En las operaciones de capa física del HARQ el receptor conserva los paquetes calificados como erróneos para una posterior combinación con el nuevo paquete de datos una vez la retransmisión es recibida. Al aumentar la información que se dispone en el receptor gracias a las retransmisiones, la SINR necesaria para cumplir con la BLER disminuye.

El intervalo de tiempo que transcurre desde la detección del error a la retransmisión de un paquete es de un RTT.

2.6. Asignación de recursos radio (PS)

La asignación de recursos o *Packet Scheduler* (PS) es una de las partes más importantes del RRM, ya que es el encargado de asignar a cada usuario los recursos necesarios para satisfacer sus necesidades de QoS. Esta asignación de recursos se realiza en modo oportunista, es decir, se aprovecha el hecho de que los distintos usuarios que piden los recursos experimentan diferentes ganancias de canal, a causa del efecto fading creado por el movimiento de los usuarios, para realizar una programación dinámica que asigna los recursos a aquellos usuarios que disponen de las mejores condiciones del canal en un instante de tiempo y una parte del espectro determinada. En el sistema, el estado de canal vendrá estimado por el CSI mediante las señales de sondeo.

La asignación de recursos por parte del PS tiene dos fases. Primero se añade a los usuarios a la cola de asignación de recursos en función de si estos han enviado el *Buffer Status Report* (BSR) y el *Scheduling Request* (SR). Posteriormente, si se han recibido estos valores, se asignan a estos usuarios los recursos estimados. En este trabajo los usuarios que pasan por el AC son los que pueden enviar este tipo de señalización para entrar en el PS.

2.6.1. Buffer Status Report (BSR) y Scheduling Request (SR)

Antes de asignar los recursos disponibles entre los usuarios conectados al eNB, el PS debe decidir que usuarios entrarán en la cola de asignación de recursos en función del BSR y el SR enviados. El sistema sigue el proceso reflejado en la figura 2.2 que tiene como objetivo reportar al PS la cantidad de datos restantes en el buffer del usuario y la prioridad que tienen estos datos para entrar en el *scheduler*. Este mecanismo está dividido en dos fases: Activación y presentación de informes.

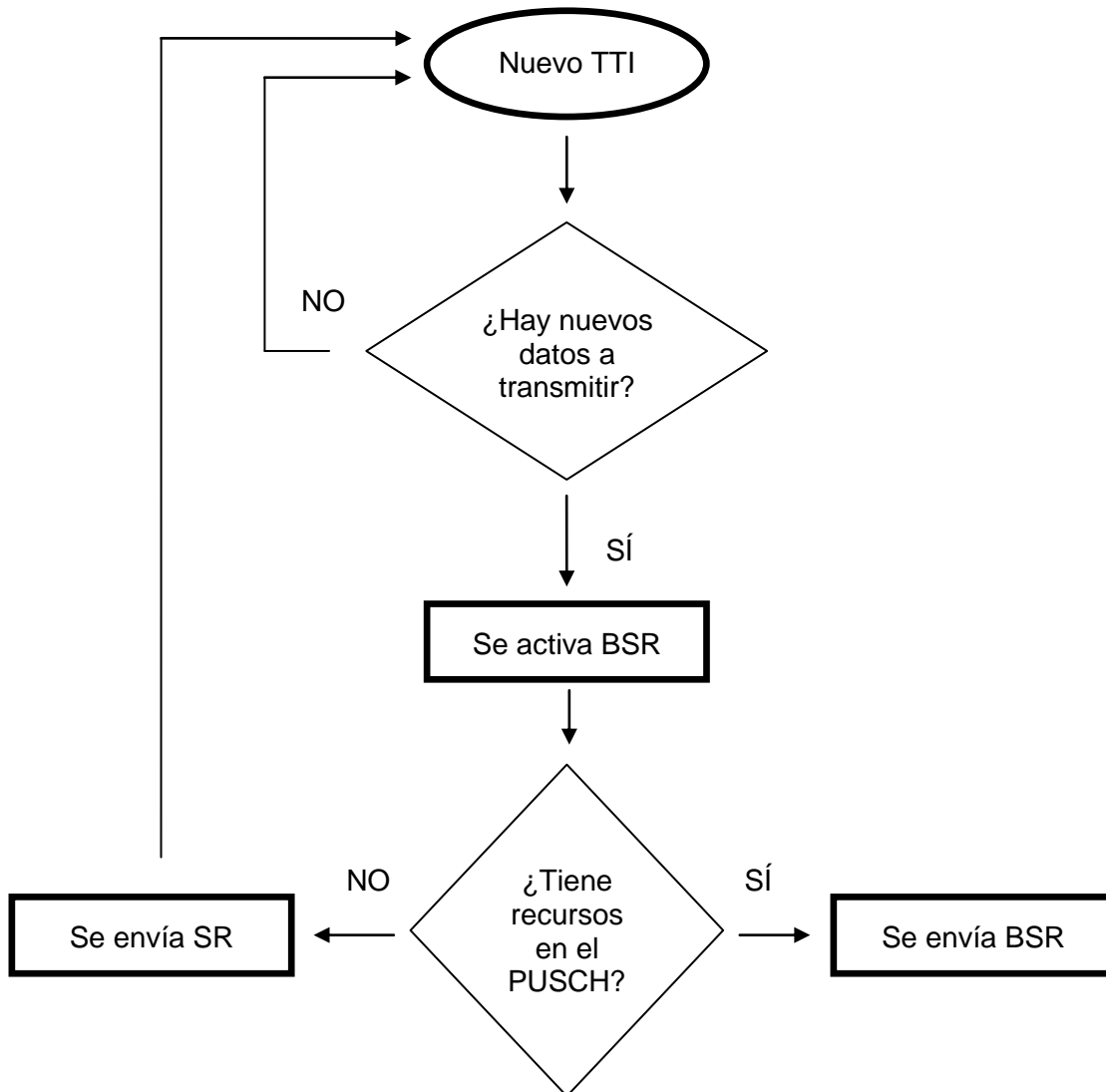


Fig. 2.2 Procedimiento de señalización en el *Packet Scheduler*.

La activación el *Buffer Status Report* (BSR) se realiza si se inicia la transmisión de datos de un usuario, es decir, si un usuario que tiene datos a transmitir a la base se conecta, o los nuevos datos a transmitir por el usuario tienen una mayor prioridad que los datos existentes.

El *Scheduling Request* (SR) se utiliza para solicitar recursos al PS cuando el usuario ha activado el BSR, pero no se le han dado recursos en el *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) en el presente TTI. De acuerdo con las especificaciones del 3GPP [9], el SR se envía como consecuencia de la activación de un BSR regular.

En cambio, los *Buffer Status Report* (BSR) se transmiten cuando se han asignado recursos en el PUSCH en el TTI actual y se ha activado el BSR e indica al eNB la información que le resta en el buffer a un usuario, es decir, la cantidad de datos que le quedan por transmitir a un usuario.

2.6.2. Asignación de recursos

Una de las restricciones más importantes a tener en cuenta en el PS es que la asignación de recursos a los usuarios ha de ser continua dentro del ancho de banda del sistema. Esta limitación viene dada por la naturaleza de la modulación de capa física SC-FDMA que requiere esta forma de transmisión por parte de los usuarios.

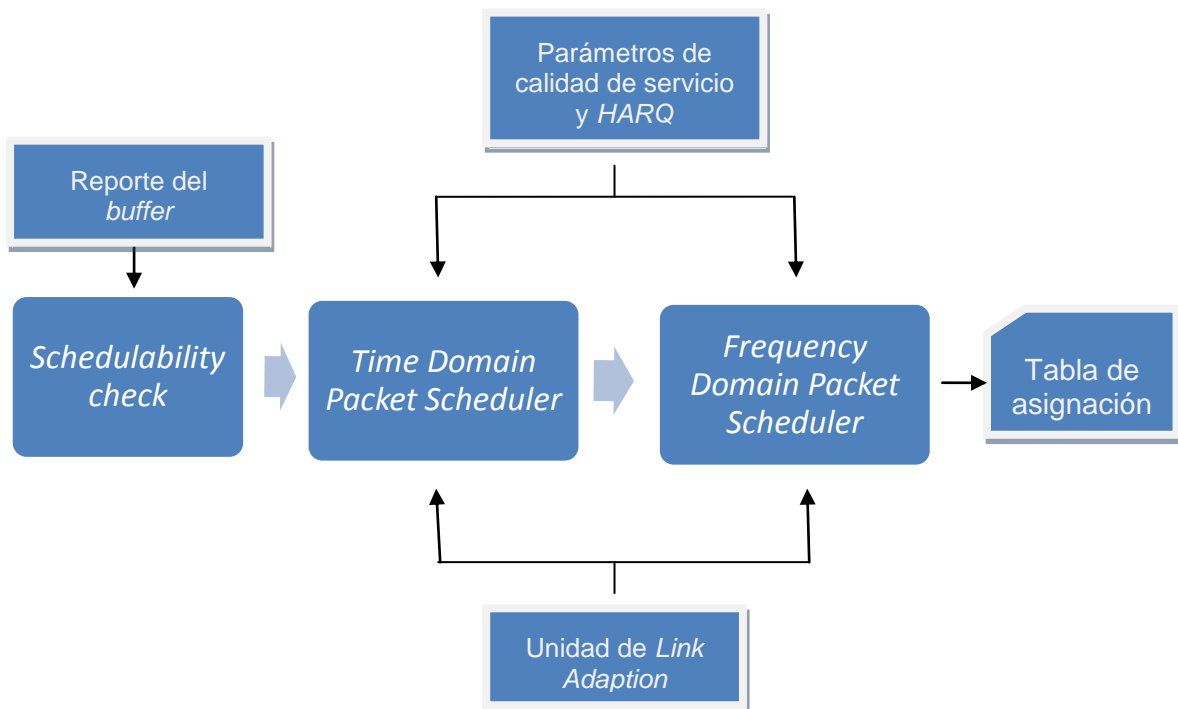


Fig. 2.3 Procedimiento de asignación de recursos para los usuarios conectados.

El PS en el enlace ascendente cuenta con dos fases de trabajo. La primera en el dominio temporal, escoge a los usuarios a la espera de recursos y los ordena según sus exigencias de QoS y estado del buffer. El *scheduler* solo puede atender a 8 usuarios cada TTI, debido a una limitación del canal de control de bajada. Por tanto, el *scheduler* en el dominio temporal pasará a los 8 primeros usuarios candidatos para el *scheduler* de dominio de frecuencia, la segunda fase de trabajo. En el dominio de frecuencia los usuarios compiten por los PRBs. El scheduler asignará los recursos a aquellos usuarios que mejor provecho puedan sacarle desde el punto de vista de eficiencia espectral. Es importante tener en cuenta que es tarea del PS también priorizar las transmisiones de HARQ pendientes, que van por delante de cualquier otra nueva transmisión de datos. El procedimiento que realiza el PS con los usuarios de la base se muestra en la figura 2.3.

A la entrada del *Time Domain Packet Scheduler* (TDPS) se reciben a los usuarios que el *schedulability check* identifica como usuarios candidatos al *scheduling*. Estos usuarios son los que quieren transmitir teniendo datos en el buffer y que no están en retransmisión. Tras ello, el TDPS ordena a los usuarios según la calidad del servicio que se quiera proporcionar. Después de esto, el *Frequency Domain Packet Scheduler* (FDPS) asigna los recursos intentando maximizar en todo momento la velocidad de transmisión del usuario y de la celda.

2.7. Calidad de servicio y control de admisión

El AC se encuentra, al igual que las funcionalidades RRM, dentro del eNB y utiliza la información de carga de la celda para tomar sus decisiones. El AC tiene como principal objetivo determinar si un nuevo usuario puede conectarse al eNB. El requisito básico que tiene en cuenta el AC a la hora de tomar la decisión de dejar entrar a un nuevo usuario, es la preservación de la QoS de los usuarios que ya estaban transmitiendo datos y la garantía de satisfacción de la QoS de los nuevos usuarios admitidos en el sistema.

2.7.1. Calidad del servicio (QoS)

La calidad del servicio de cualquier EPS *bearer* nos será dada por dos parámetros:

- *Quality Class Identifier* (QCI). El QCI es un identificador que asigna un tipo de servicio en función de la prioridad de la transmisión, el retardo del paquete y la tasa de pérdida de paquetes.
- *Allocation Retention Priority* (ARP). El ARP se utiliza para decidir si debe aceptarse o denegarse un determinado servicio.

En el caso del QCI, el 3GPP definió una tabla en que se indica para cada tipo de servicio la prioridad, el retardo máximo, la probabilidad de error por paquete permitida y si se trata de servicios con GBR, a los que se asigna recursos dedicados, o Non-GBR (N-GBR), que contemplan la posibilidad de perder paquetes en caso de congestión. Los parámetros a cumplir se listan en la tabla 2.2 [1].

Tabla 2.2. Tabla de asignación de CQI en función del servicio. [1].

Tipo	CQI-Prioridad	Retardo[ms]	Perror paquete	Ejemplo
GBR	1-2	100	10^{-2}	Voz conversacional
GBR	2-4	150	10^{-3}	Video conversacional
GBR	3-3	50	10^{-3}	Juegos en tiempo real
GBR	4-5	300	10^{-6}	Video no conversacional
N-GBR	5-1	100	10^{-6}	Señalización IP <i>Multimedia Subsystem</i>
N-GBR	6-6	300	10^{-6}	Video <i>Transmission Control Protocol</i>
N-GBR	7-7	100	10^{-3}	Voz Video Juegos interactivos
N-GBR	8-8	300	10^{-6}	Video
N-GBR	9-9	300	10^{-6}	<i>Transmission Control Protocol</i>

2.7.2. Algoritmos de control de admisión

El AC tiene que garantizar que cuando un nuevo usuario acceda al sistema tanto el QoS requerido por el nuevo usuario, como la conservación del QoS establecido para cada uno de los usuarios que ya están conectados al eNB. Las especificaciones que se han tomado en este TFC respecto al AC son:

- El criterio básico con el que se calcula el QoS de un usuario es su *Guaranteed Bit Rate* (GBR) en la transmisión.
- Cada usuario solo realiza una transmisión de una determinada cantidad de datos. Por lo tanto, cada nueva transmisión equivale a un nuevo usuario conectado a la base.

Teniendo esto en cuenta, se proponen dos algoritmos que tengan en cuenta el GBR: el algoritmo basado en SRS que se implementa en este proyecto y el algoritmo de referencia, el cual se utiliza para comparar y evaluar el comportamiento del primero

2.7.2.1. Algoritmo de referencia

El algoritmo de referencia calculará si un usuario puede acceder a la celda si la suma del GBR requerido por el usuario (GBR_{new}) junto al GBR requerido por cada uno de los usuarios ya conectados a la celda (GBR_i) es menor o igual al flujo de datos o *throughput* medio de la celda (R_{max}) tal y como se ve en la fórmula 2.2, siendo K el número de usuarios ya conectados a la celda.

$$\sum_{i=1}^K GBR_i + GBR_{new} \leq R_{max} \quad (2.2)$$

Algunos problemas que conlleva este algoritmo son los siguientes:

- Los usuarios no están diferenciados en función de la calidad del canal determinada por su localización en la celda.
- El valor de R_{max} es un parámetro fijo que no representa un rendimiento medio actualizado de la celda. En el caso de que R_{max} tienda a infinito, el AC admitiría a todos los usuarios y el simulador funcionaría como si no existiera AC en el eNB.

2.7.2.2. Algoritmo basado en los SRS

Para solucionar los problemas propios del algoritmo de referencia se crea el algoritmo de AC basado en los valores de SINR obtenidos del *sounding*. Este algoritmo tiene en cuenta el número de recursos, es decir, el número de PRBs que requieren los usuarios del sistema basado en los requisitos del GBR.

Para cumplir con estos requisitos, un usuario puede ser asignado un mayor ancho de banda y transmitir con menor densidad de potencia *Power Spectral Density* (PSD), es decir, menor MCS y, por consiguiente, menor SINR, o justamente lo contrario, ocupando un menor ancho de banda. Así pues, el algoritmo de AC basado en SRS permite comprobar si la asignación de recursos puede ser modificada con el objetivo de admitir un nuevo usuario y satisfacer el GBR tanto del nuevo usuario como el de los usuarios ya conectados a la celda.

Este algoritmo tiene como criterio de admisión que la media de PRBs requeridos por TTI por el usuario que desea conectarse al eNB (N_{new}) y los PRBs requeridos por los usuarios existentes (N_i) sea menor o igual al número de PRBs totales que el ancho de banda tiene disponibles (N_{tot}) menos ciertos PRBs utilizados para la señalización (ΔN), como se expresa en la fórmula 2.3.

$$\sum_{i=1}^K N_i + N_{new} \leq N_{tot} - \Delta N \quad (2.3)$$

Por tanto, el problema a resolver es el cálculo de los valores de N_i y N_{new} para satisfacer los requerimientos de QoS. Partiendo de la información que el eNB ya posee mediante las SRS, la estación base puede estimar el número de PRBs requerido por cada usuario. Basándose en las señales de sondeo, el eNB puede estimar la SINR media en el ancho de banda del sistema. Dado que existe una correspondencia directa entre la SINR medida y el MCS que provee un cierto valor de BLER, el eNB puede calcular el número de bits que puede transmitirse en un PRB. De este modo el número de PRBs necesario para cumplir con la QoS viene dado por:

$$N_i = \frac{GBR}{Thr_{MCS_{wideband}}} \quad (2.4)$$

Donde $Thr_{MCS_{wideband}}$ es la velocidad de transmisión en un PRB. Aplicando la ecuación 2.4 se puede calcular ambos N_i y N_{new} .

2.7.2.3. Modelado de entrada de usuarios.

La llegada de usuarios al eNB sigue un patrón aleatorio y el AC debe decidir para cada uno de ellos, cuál puede conectarse a la base en función de los parámetros de calidad. Para simular esta llegada constante y aleatoria de usuarios, el sistema modela el proceso de llegada de usuarios con un proceso de Poisson. Este modelado compara la probabilidad de entrada de n usuarios con una variable aleatoria, con el objetivo de simular la llegada aleatoria de usuarios a la celda durante toda la simulación.

El proceso de Poisson determina el número de usuarios que entran al sistema en un cierto período de tiempo tal y como se observa en el fórmula 2.5, donde $N(t)$ es el número de usuarios que entran al sistema en el período de tiempo t , n es el número total de usuarios y λ es el *rate* de llegada de usuarios cada periodo de tiempo.

$$P\{N(t) = n\} = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

La llegada de usuarios prosigue pese a que el eNB no pueda aceptar más usuarios, ya que es posible que un nuevo usuario tenga unos requisitos de QoS más bajos y pueda garantizar la calidad tanto para él como para el resto de usuarios conectados a la base, o de lo contrario, que un usuario conectado acabe su transmisión dejando lugar a otro nuevo.

2.7.2.4. Parámetros de funcionamiento

Para evaluar el correcto funcionamiento de los algoritmos del AC y validar cuál de ellos se adapta mejor a los requisitos de QoS de LTE, se procede a evaluar la probabilidad de corte u *outage* (P_o). Esta probabilidad está definida como el número de usuarios que, una vez acabada la transmisión, han incumplido los requisitos GBR de su transmisión sobre el número total de transmisiones terminadas. Este parámetro es fundamental para evaluar que el AC esté funcionando correctamente, ya que al tomar el GBR como el parámetro básico del QoS, si el GBR no se cumple, el AC no estará cumpliendo su propósito.

CAPÍTULO 3. SIMULADOR BASADO EN LTE

Para evaluar el funcionamiento de los algoritmos presentados, este proyecto utiliza un simulador de sistema que coloca usuarios en diversas celdas y analiza el funcionamiento de los procedimientos del RRM. Además, el simulador presenta flexibilidad en cuanto a los parámetros de entrada con el objetivo de poder simular diferentes situaciones del sistema.

En este capítulo se explica los bloques de funcionamiento desarrollados en el programa, centrados básicamente en la gestión de los recursos radio en el UL. También se detallan las modificaciones llevadas a cabo en el simulador original con el objetivo de asumir el nuevo bloque implementado: el AC. Se destacan la implementación de un buffer limitado para las transmisiones, un control de acceso de usuarios dependiente del QoS y un algoritmo evolucionado de asignación de recursos para el *sounding* en el caso que el número de grupos de usuarios sea más elevado que la cantidad de bloques de sondeo a repartir.

3.1. Introducción

Para evaluar el sistema LTE y las operaciones de RRM este TFC se sirve de un simulador que modela un escenario de comunicaciones móviles basado en la tecnología LTE. El simulador está programado completamente en el lenguaje C# (C-Sharp), lenguaje orientado a objetos, dentro del marco digital .NET.

El simulador de sistema está estructurado de tal manera que se genera un escenario, se crean usuarios dentro de él y se efectúan las operaciones más importantes del RRM antes explicadas: Adaptación al enlace, control de potencia, control de error, información del estado del canal, asignación de recursos, y por último, el bloque añadido en este trabajo, el control de admisión.

En el escenario se realizan transmisiones continuas en el enlace ascendente, es decir del terminal a la base, sin embargo, la mayoría de operaciones antes mencionadas tienen lugar en el eNB.

A continuación se explican los bloques funcionales del simulador y los algoritmos necesarios para modelar las operaciones de sistema en LTE.

3.2. Estructura del simulador

El simulador está estructurado en diversas clases, tal y como se muestra en la figura 3.1, siendo el Control de Admisión (AC), la clase en la que se ha centrado este proyecto.

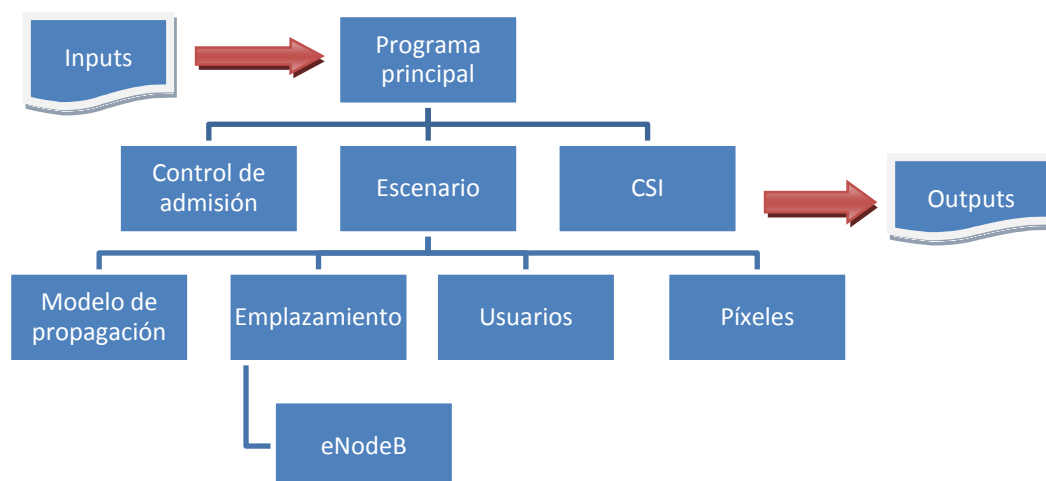


Fig. 3.1 Diagrama de clases del simulador [5].

El sistema requiere de unos parámetros de entrada o *inputs* que alimentan al programa y que permiten crear el escenario y las diferentes clases que dependerán de él, como son los píxeles, los usuarios, los emplazamientos, las bases y el modelo de propagación. Una vez realizadas las operaciones, el simulador generará unos ficheros de salida, con toda la información útil de la simulación.

Por otro lado, dado que las funcionalidades propias del simulador están desarrolladas en una biblioteca de clases, el programa principal de arranque gestiona el inicio y el final de la simulación. Lo que comporta gestionar la duración de la simulación, cargar todos los *inputs* e inicializar la biblioteca de clases.

3.2.1. Escenario

La clase escenario es probablemente la más importante en cuanto a operaciones a realizar dentro de la biblioteca de clases. En ella, se desarrollan las principales funciones del sistema, entre ellas, destaca:

- Crear el escenario a partir de los datos de entrada: Generación de los píxeles e inicialización de los modelos de propagación y del terreno.
- Crear los emplazamientos: A partir de los inputs, se crean los objetos emplazamiento y eNB, los cuales contienen toda la información relacionada con estos elementos del sistema.
- Crear los usuarios y colocarlos en posiciones aleatorias dentro de una celda, teniendo en cuenta una distribución uniforme de los mismos.

3.2.2. Píxeles y modelo de propagación

La plataforma de simulación está orientada a píxeles, lo que significa que toda la información referente al escenario está guardada en cada pixel que lo conforma. Los píxeles almacenan información como el *shadowing*, las pérdidas hacia todos los eNodeB o la distancia e identidad de la base más cercana. En los píxeles es dónde se sitúa a los diferentes usuarios del sistema, los cuales reciben toda la información sobre el escenario que posee el pixel. Por lo tanto, la distribución de los usuarios en el escenario es una de las primeras acciones que debe realizar el simulador, ya que si no fuese así, el usuario no tendría información sobre el escenario.

El bloque del modelo de propagación está a cargo de modelar las pérdidas de propagación, calcular el los desvanecimientos lentos (*shadowing*) para cada pixel y cargar la información del canal de comunicaciones, *fast fading channel*. El modelo de propagación aplicado es el que se expresa en la siguiente fórmula:

$$L_{pathloss} = 10\log_{10} \alpha + L_{FF} \quad (3.1)$$

Donde $L_{pathloss}$ son las pérdidas del canal, α es la atenuación entre el usuario y el eNB y L_{FF} son las pérdidas de canal de *fast fading*. El *shadowing* está modelado como una distribución lognormal correlada espacialmente. Por otro lado el canal de *fast fading* utilizado en esta plataforma es un archivo binario que se exporta de un simulador externo y se importa al bloque de modelo de propagación. La matriz de canal tiene una dimensión del tiempo lo suficientemente larga como para poder colocar a todos los usuarios del sistema en diferentes instantes de tiempo desde el inicio, asegurando así que todos los canales de los diferentes usuarios no estén correlados. El modelo utilizado para la generación del canal es el que se presenta en [8]. Por otro lado, cada usuario posee un canal distinto hacia cada eNB del escenario. El canal implementado en este caso es el ITU Extended TypicalUrban, y se asume que los usuarios se desplazan a 3km/h.

3.2.2.1. Usuarios y emplazamientos

El objeto usuario posee las características propias tanto del terminal móvil como de las transmisiones que desea realizar. Así pues, a través del mismo se pueden conocer las limitaciones de potencia del terminal, la información restante en su buffer, el GBR de la transmisión, etc. El objeto emplazamiento posee información del tipo geográfico y del escenario, del tipo:

- Coordenadas X, Y del emplazamiento.
- Información referente a las antenas de los transmisores.
- Información de los sectores del emplazamiento.

Por otro lado, el objeto eNB tiene toda la información necesaria para efectuar las operaciones del RRM propias de la base, como son el PS y el HARQ. Más adelante se explica en detalle la implementación de dichas operaciones.

3.3. Clase CSI

La clase CSI, además de realizar el *scheduling* de sondeo, se encarga de recoger toda la información referente a los cálculos del estado del canal, lo que implica:

- Cálculos de cualquier tipo de SINR.
- Importación de datos de MCS y BLER.
- Importación de los datos necesarios para la asignación del ancho de banda de sondeo.

3.4. Herramienta software

La herramienta software de simulación está formada por 5 bloques que desarrollan las principales funcionalidades RRM: HARQ, PS, LA, AC y CSI. En la figura 3.2 se puede observar como todos los bloques están conectados y dependen entre sí, con lo cual existe un flujo de información constante entre ellos.

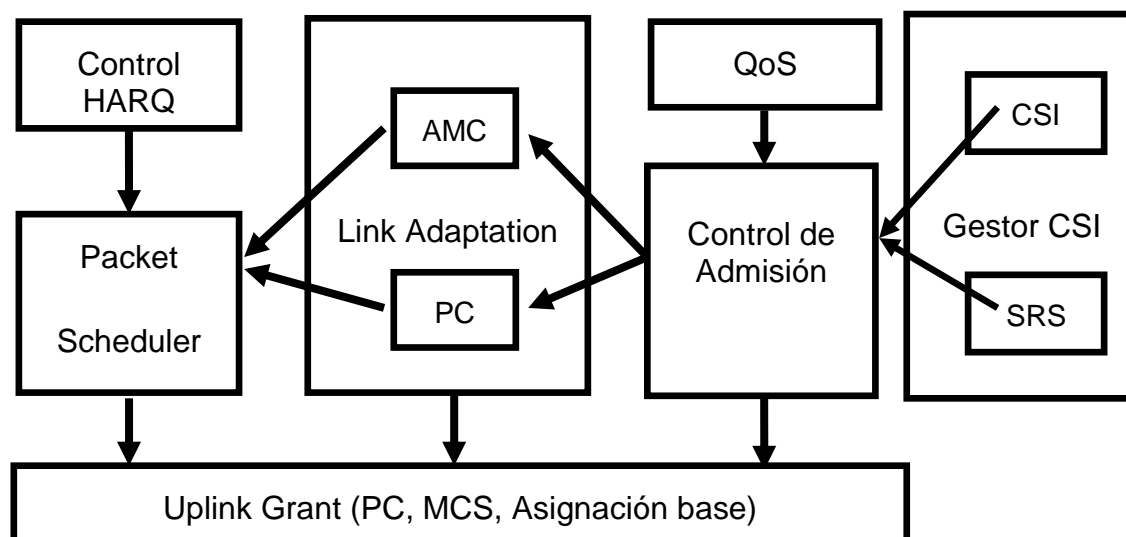


Fig. 3.2 Diagrama de bloques del simulador [5].

3.4.1. Información sobre el estado del canal en el simulador

La información del estado del canal viene determinada por el bloque CSI. Este bloque, como ya se ha comentado en el capítulo anterior, obtiene la estimación del estado del canal a partir de los SINR calculados del *sounding*, el cual está basado en el ancho de banda de sondeo asignado por la base. A continuación se explica tanto el funcionamiento del *sounding* como el cálculo del SINR a partir de las SRS.

3.4.1.1. Funcionamiento del *sounding*.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, el proceso de sondeo de canal es realizado por parte de los usuarios del sistema, los cuales envían SRSs en una parte de su ancho de banda. Por otro lado el eNB juega un papel importante en la gestión de los recursos de sondeo cada TTI.

El eNB, al asignar los recursos para realizar el *sounding*, tiene como prioridad que se realice en las partes del ancho de banda en las que el *sounding* sea más antiguo, o bien, en aquellas en las que aún no se ha realizado. Como se ha visto en el apartado 2.5, es indispensable que el PS conozca el estado de todo el ancho de banda de todos los usuarios para que se asignen recursos a los usuarios que más rendimiento les pueden sacar, y por tanto, poder obtener una mejor explotación del ancho de banda.

Para seleccionar los PRBs que sondeará un usuario se tiene que tomar en cuenta dos características del *sounding* en LTE que se han comentado en el capítulo 2.1:

- Los usuarios pueden sondear la misma banda sin interferirse. Sin embargo, la cantidad de usuarios estará limitada a 6 usuarios por grupo.
- No se pueden sondear PRBs individualmente, sino que esta asignación se tiene que realizar bloques de PRBs adyacentes. El ancho de banda mínimo de sondeo es de 4 PRBs, que corresponderá con 1 bloque de sondeo.

La cantidad de bloques de PRBs que se querrán asignar a cada grupo de usuarios es un valor clave para que el sistema de sondeo funcione de manera óptima. Asignar pocos bloques de PRBs comporta que se sondee poco ancho de banda y, en funcionalidades RRM posteriores, como la asignación de recursos del PS, no se puedan tener en consideración todos los recursos de la banda. Por otro lado, si se sondea una gran cantidad de PRBs para un determinado grupo de usuarios, el resto de grupos de usuarios no recibirán recursos en ese TTI. Por lo tanto, la asignación de los PRBs no es trivial y la cantidad de bloques que se sondean puede comportar una variación del funcionamiento del sistema y la asignación correcta de recursos para la transmisión de datos.

Como punto de partida para la asignación de recursos de sondeo, el SRS *scheduler* realiza dos operaciones básicas:

- Cálculo del número de bloques SRS: Ancho de banda total, entre el número mínimo de recursos de sondeo, 4 PRBs.
- Cálculo del número de bloques de usuarios: El total de usuarios por celda dividido el número de usuarios por bloque, 6.

El ancho de banda de sondeo viene dado por el número de bloques que se asignan a los usuarios, siendo 1 equivalente a 4 PRBs, 2 a 8 PRBs, y así sucesivamente, hasta 20 que equivale a los 80 PRBs del sistema.

De este modo, dependiendo del ancho de banda de sondeo (número de bloques SRS a asignar) puede ocurrir que la periodicidad en la que los usuarios sondean el canal sea superior a 1 TTI. En este caso, se distinguen dos tipos de situaciones en el simulador:

- El ancho de banda de sondeo es tal que todos los usuarios sondean un trozo de la banda cada TTI.
- El ancho de banda de sondeo incrementa y en cada TTI consiguen sondear solo algunos grupos de usuarios.

En la primera situación, al que llamaremos asignación sin PRBs sobrantes, se otorgará a cada usuario el bloque de sondeo establecido. Este modelo presenta el principal problema de que dependiendo el número de bloques SRS a asignar, habrán bloques que se quedarán sin sondear por ningún grupo de usuarios. La asignación de bloques en este caso es bastante simple, ya que a cada usuario se le otorgan los bloques asignados en un TTI y en el siguiente TTI se continúan asignando los bloques posteriores a los asignados. Esto se hará hasta completar todo el ancho de banda, una vez se ya hecho, se repetirá la operación hasta el final de la simulación, ya que las funcionalidades RRM necesitan tener estos valores lo más actualizados posible.

Esta distribución se puede observar en la figura 3.3. En este caso, el ancho de banda está compuesto por 40 PRBs distribuidos en 10 bloques de 4 PRBS, hay 4 grupos de usuarios formados por 6 usuarios cada uno y el ancho de banda de sondeo es de 2 bloques SRS. Este es el caso definido en la primera situación ya que con esta configuración todos los usuarios conseguirían sondear cada TTI.

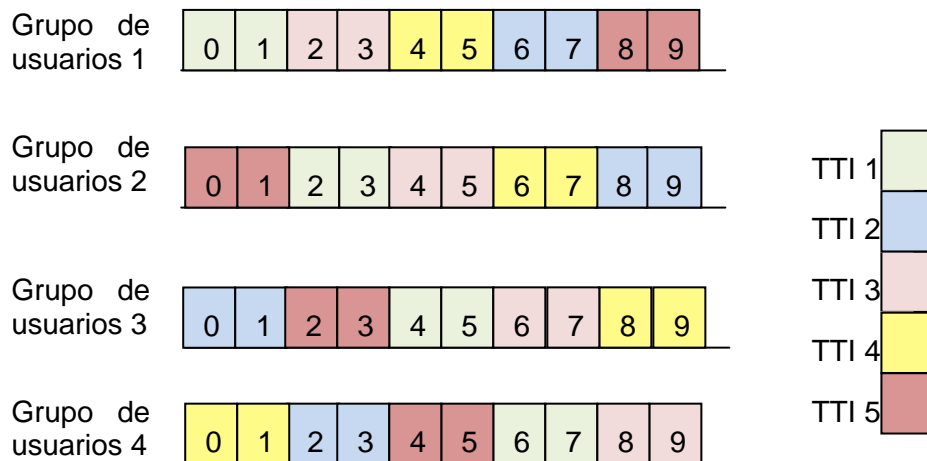


Fig. 3.3 Distribución de bloques sin PRBs sobrantes.

La segunda situación definida sucede cuando o bien el número de bloques que se desea sondear es muy elevado o el número de usuarios conectados a la base es muy grande. Este algoritmo de *scheduling* se ha creado en este proyecto ya que era necesario para conocer los efectos de sondear un mayor o menor ancho de banda para un elevado número de usuarios.

El procedimiento básico de este algoritmo es:

- Se comienza asignando los bloques SRS del ancho de banda de sondeo a los grupos de usuarios.
- En el caso que queden usuarios sin sondear en ese TTI, el algoritmo comenzará la asignación en este punto al siguiente TTI, y hará lo mismo que en el primer paso.
- Para poder conservar la asignación en función del sondeo más antiguo, el algoritmo conserva la última asignación de cada usuario. En algunos casos, los usuarios no podrán obtener el ancho de banda de sondeo deseado, ya que puede haber sido asignado a otro usuario con mayor prioridad.

Dado que la asignación no será regular en todos los casos, ya que los anchos de banda y el número de grupos de usuarios pueden generar descuadres en la asignación, existirá la situación en la que un usuario vea reducido su ancho de banda de sondeo debido a que no quedan PRBs libres para la asignación.

En la figura 3.4 se puede observar un ejemplo gráfico de lo explicado anteriormente. En este ejemplo, se dispone de 10 bloques de 4 PRBs a asignar a 4 grupos de usuarios. Aunque al inicio la distribución es muy parecida a la explicada en el primer caso, la asignación finaliza cuando se han acabado los bloques SRS disponibles.

Por tanto, en el siguiente TTI el *scheduler* comenzará por el grupo de usuarios que no consiguió sondear en el TTI anterior. Se hará este procedimiento hasta llegar al final de bloques SRS disponibles, como en el caso anterior.

De ese modo, como la asignación no es regular, existirán usuarios que sondeen más TTIs seguidos que otros. Esto dependerá de la asignación que se haya efectuado en el instante presente y en los instantes anteriores.

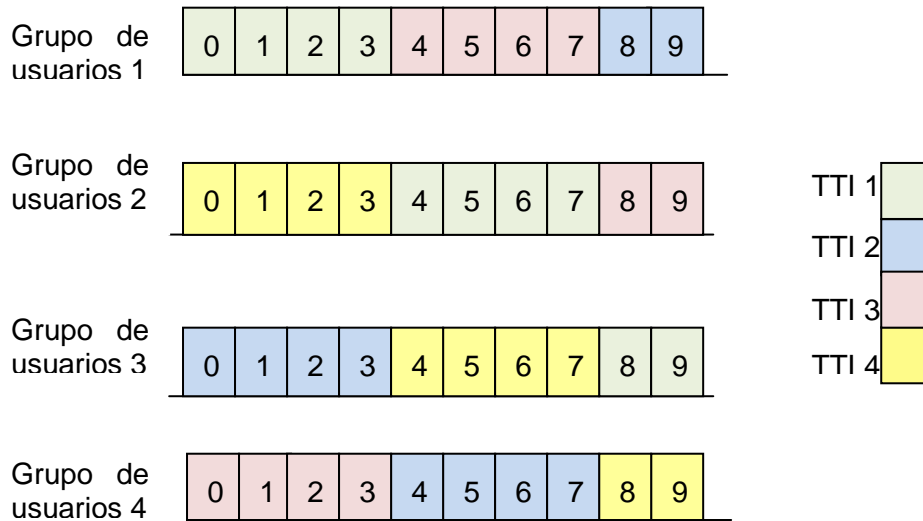


Fig.3.4 Distribución de bloques con PRBs sobrantes.

Una vez asignado el ancho de banda de sondeo, se calcula la potencia de transmisión de estas señales. En este caso, las señales de sondeo se transmiten con un control de potencia igual que el de las señales de datos.

3.4.1.2. Funcionamiento del CSI.

Al margen de la asignación de anchos de banda, el CSI calcula las SINR de las señales de sondeo recibidas en el eNB. De este modo, por cada PRB se almacena el valor de SINR más actualizado para que posteriormente se pueda realizar es *scheduling* en el dominio de la frecuencia. El cálculo de SINR tanto para las señales de sondeo como para las de datos contempla dos tipos de interferencias. Dado que LTE es un sistema distribuido, las bases no tienen porque transmitir de manera síncrona, por lo que si en un determinado momento una base envía un símbolo SC-FDMA de datos, otra puede estar enviando un símbolo de señalización. Por tanto, las señales recibirán interferencias de dos tipos, $P_{interferente1}$ que corresponde a las interferencias de datos y $P_{interferente2}$ que corresponde a las interferencias de las señales de sondeo enviadas en la misma banda por otras celdas. El cálculo de la SINR se refleja en la ecuación 3.2.

$$SINR_{sondeada} = \frac{P_{Rx}}{P_{interferente1} + P_{interferente2} + P_{ruido}} \quad (3.2)$$

Estos valores de SINR se adjuntarán a una matriz donde se irán acumulando el valor de SINR de cada PRB de cada uno de los usuarios conectados al sistema. Cada vez que se realice un nuevo sondeo de algún PRB, la matriz actualizará su valor de SINR. Como ya se ha comentado, como más actualizada esté la matriz, la estimación del canal será más cercana a la realidad y las funcionalidades RRM funcionarán de manera más óptima.

3.4.2. Asignación de modos de transmisión en el simulador

El objetivo de este bloque es asignar una modulación y un código a la transmisión en función de los valores de SINR medidos calculados por el CSI, es decir, según la estimación del canal realizada. Para saber que modulación y codificación utilizar, el simulador se sirve de unas tablas de consulta provenientes de un simulador a nivel de enlace y que se han mostrado en la tabla 2.2 de este proyecto. Estas tablas ofrecen relación directa entre el MCS que buscamos, el valor del SINR y el del *Block Error Rate* (BLER), que no puede ser superior al 10%.

3.4.3. Control de potencia en el simulador

Para regular la potencia transmitida por los usuarios se aplica la ecuación 2.1 antes presentada. En este caso las variables adjudicadas para este escenario serán:

- $P_0 = -60$ dBm
- $\alpha = 0.6$

El resto de variables de control permanecerán a cero. En el simulador, por tanto, se aplica un control de potencia de lazo abierto, ya que las correcciones a nivel de eNB quedan canceladas.

Para controlar que los usuarios pueden transmitir dentro de sus posibilidades, el control de potencia verifica que según los parámetros del usuario (pérdidas), las variables establecidas y el número de PRBs asignados, la potencia de transmisión no supere el máximo definido para un terminal de LTE, 24 dBm en este caso. De este modo, en el PS, si ningún usuario fuera capaz de transmitir el ancho de banda fijado, se vería reducido hasta compaginar con las capacidades de los usuarios conectados a la celda.

3.4.4. Unidad de control de errores en el simulador

La funcionalidad que cumple el HARQ, tal y como se ha explicado en el capítulo anterior, es regular el control de errores de la transmisión. Dada la SINR final de la transmisión y el MCS asociado, se calcula la BLER equivalente a esta transmisión. Se lanza una variable aleatoria que se compara con el valor de BLER equivalente, para determinar si un paquete es erróneo o no.

Si en efecto el paquete se debe retransmitir, el tipo de retransmisión que se utiliza en el sistema consiste en enviar exactamente el mismo paquete que en la transmisión fallida, es decir, con la misma codificación (MCS) y con el mismo número de recursos asignados (PRBs) [1]. Pese a ello, debido a que el HARQ realiza una redundancia incremental, en cada retransmisión se verán modificados tanto la media de la BLER como el SINR medido. En este caso, cada vez que una retransmisión llega al controlador de HARQ se dobla la SINR final para este paquete de datos.

Una vez se haya realizado este proceso de retransmisión más de 3 veces, el HARQ tomará la decisión de descartar el paquete y añadirlo a la lista de paquetes perdidos. El principal motivo que provoca, la retransmisión de paquetes es que los valores de estimación del canal dados por el CSI no se parezcan a los valores reales, con lo cual los datos no se transmiten con el MCS adecuado al canal.

El HARQ también se utiliza para indicar al eNB que un usuario ya ha transmitido todo su buffer, ya que este bloque calcula la cantidad de datos totales que se han recibido en esta transmisión. Así, el HARQ marca a los usuarios que han transmitido toda la información que disponían en el buffer para que se proceda a su desconexión de la base y se valore las características finales de toda la transmisión.

3.4.5. Asignación de recursos radio en el simulador

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.6, el PS cuenta con dos fases de trabajo. La primera fase, TDPS, se encarga de ordenar a los usuarios que desean obtener recursos en ese mismo TTI, en función de los datos que desean transmitir. Antes de establecer un modelado de tráfico de buffer fijo, en el cual los usuarios transmiten unos paquetes de datos con una determinada GBR, la cuantía de la velocidad a transmitir se hacía calculando la media del *throughput* en toda la banda. Sin embargo, en este caso, la velocidad que cada usuario requiere para transmitir estará determinada por el servicio, es decir, por el GBR. El algoritmo aplicado en el TDPS es un *proportional fair* basado en el *throughput*, tal y como se puede ver en la fórmula 3.3.

$$M_{\text{TDPF},i} = \frac{GBR}{T_i} \quad (3.3)$$

Dónde T_i corresponde al historial de throughput acumulado en TTIs anteriores. Por tanto, de manera natural aquellos usuarios que consigan transmitir grandes cantidades de datos, pasarán al final de la lista.

Hay que tener en cuenta que no todos los usuarios pueden acceder al TDPS, sólo lo harán aquellos que no tengan retransmisiones pendientes y hayan sido aceptados por el AC. En cuanto al FDPS, para hacer la asignación de recursos se utiliza un algoritmo *proportional fair*, pero esta vez basado en la SINR de cada PRB, ecuación 3.4.

$$M_{\text{FDPS},i} = \frac{SINR_{\text{PRB}_n}}{SINR_{\text{media}_{\text{ancho de banda}}}} \quad (3.4)$$

En este caso, la métrica se define como la razón entre la SINR de un PRB en cuestión y la media de la SINR en toda la banda. Cuanta más alta sea la métrica significará que el PRB está por encima de la media, por tanto, debería ser asignado allí dónde es mayor, para poder aumentar la eficiencia espectral.

En este simulador, el ancho de banda que se asigna en cada TTI es de 10 PRBs y es un ancho de banda fijo. Al asignar los recursos se comprueba también que el usuario pueda transmitir en este ancho de banda sin superar la potencia máxima transmitida, en caso de que ningún usuario lo consiguiera, el ancho de banda se reduciría en 1 PRB hasta conseguir el número máximo de usuarios que es posible asignar en cada TTI, en el caso de LTE UL 8.

Un caso aparte serán los usuarios que estén retransmitiendo paquetes en este TTI. Estos usuarios no entran en la lista de usuarios creada por el *scheduler* temporal y es prioritario que reciban recursos.

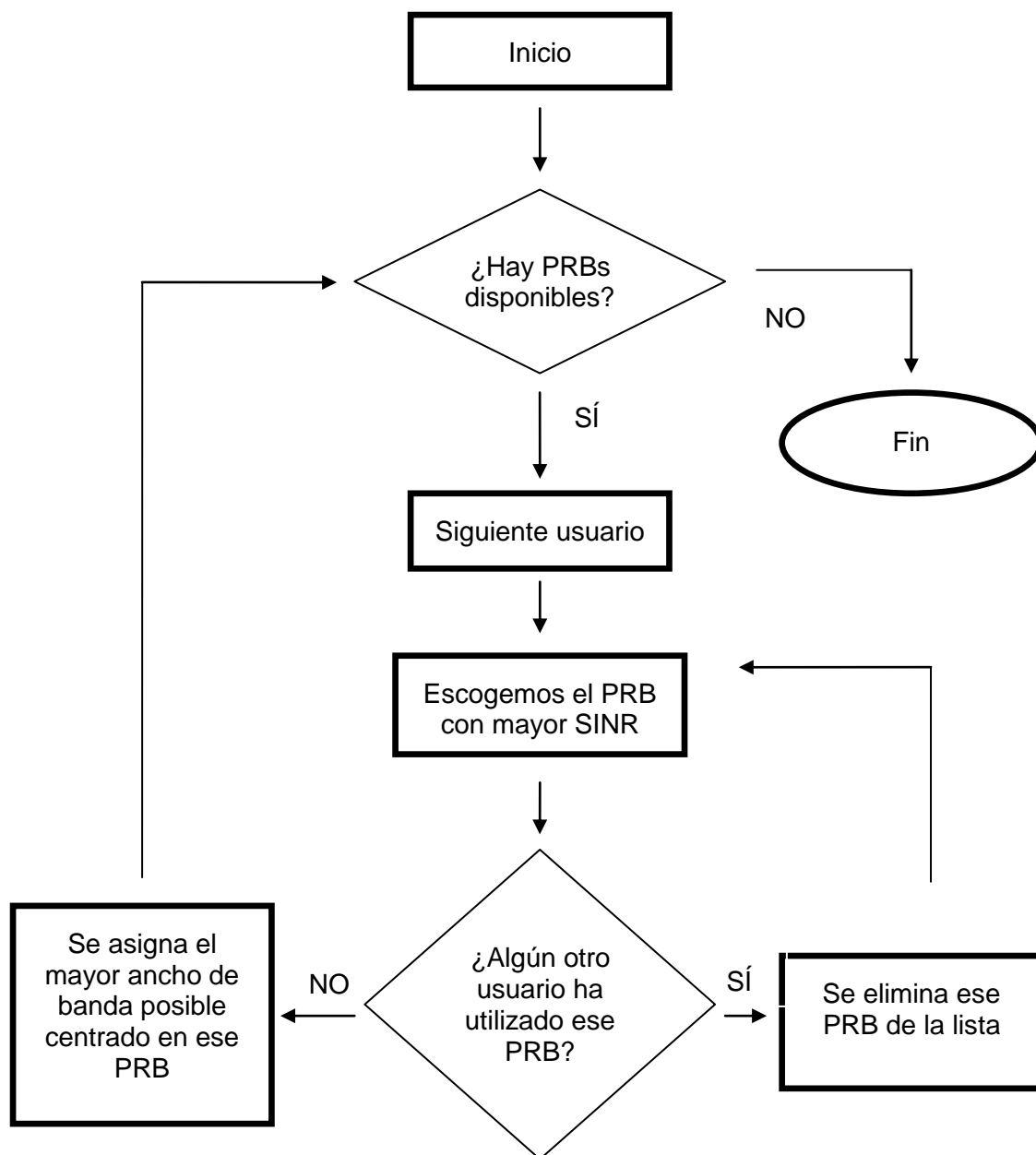


Fig.3.5 Procedimiento de asignación de recursos en el PS.

3.5. Control de admisión del simulador.

Este bloque es la principal implementación realizada en este proyecto. Antes de esta inclusión, el programa consideraba a todos los usuarios como conectados y con buffer de transmisión infinito, es decir, durante toda la simulación todos los usuarios conectados deseaban transmitir información.

Esto ha sido modificado, y ahora los usuarios conectados a la base únicamente reciben recursos de sondeo, para de esta manera estar preparado en condiciones óptimas para la transmisión. Cuando un usuario conectado a la base, desea pasar al modo activo, es decir, cuando tiene datos a transmitir, ha de pasar por el AC.

El modelado de usuarios que desean pasar del modo conectado al modo activo se realiza mediante un proceso de Poisson. Los usuarios permanecerán activos hasta que se vacíe el buffer. Una vez se ha finalizado su comunicación, estos usuarios pasan a estado conectado nuevamente, y si desean volver a tener una comunicación tendrán que pasar nuevamente por el AC.

El procedimiento que se utiliza en el AC dependerá del algoritmo utilizado, ya sea el de referencia o el basado en los valores de SINR obtenidos del CSI. A continuación se explica el funcionamiento del algoritmo en función de las SRS, ya que es el que presenta mayor complejidad y posteriormente se presenta el funcionamiento del algoritmo de referencia en este simulador.

Tal y como muestra la figura 3.6, los usuarios acceden al sistema en función de la probabilidad de Poisson determinada por el tiempo transcurrido y el rate de llegada de usuarios. Estos usuarios intentan conectarse entrando en el control de admisión, el cuál consultará al CSI los valores de SINR de estos usuarios.

Con estos valores de SINR y la modulación utilizada, se podrán calcular los PRBs necesarios para transmitir el *throughput* requerido por su QoS, el GBR, siguiendo el procedimiento explicado en el anterior capítulo. En función de los PRBs requeridos, el algoritmo aceptará o no al usuario en función de que se cumpla la ecuación 2.3.

La parte más interesante de este algoritmo es que la cantidad de PRBs requeridos por los usuarios ya conectados al sistema variará en cada TTI con lo que la dificultad para conectarse a la base no dependerá únicamente de los usuarios conectados, sino que también dependerá de las condiciones de canal que estos presenten.

En el caso del algoritmo de referencia, el procedimiento general se asemeja bastante al del algoritmo anterior, pero en este caso no se requieren los valores de SINR del CSI. Para este algoritmo, el control de admisión únicamente requiere un valor máximo de referencia que limite la entrada de usuarios en función del GBR que requiere cada usuario. Este algoritmo no tiene en cuenta las variaciones que puede sufrir el sistema durante su simulación y, a diferencia del AC basado en SRS, no variará en ningún momento. Sin embargo, admitirá usuarios hasta cumplir con el rate máximo de la celda.

En ambos casos, antes de aceptar la conexión de un usuario en la base, se hará una verificación de potencia para comprobar que el usuario podrá transmitir sin problemas cuando se le asignen los recursos en el PS.

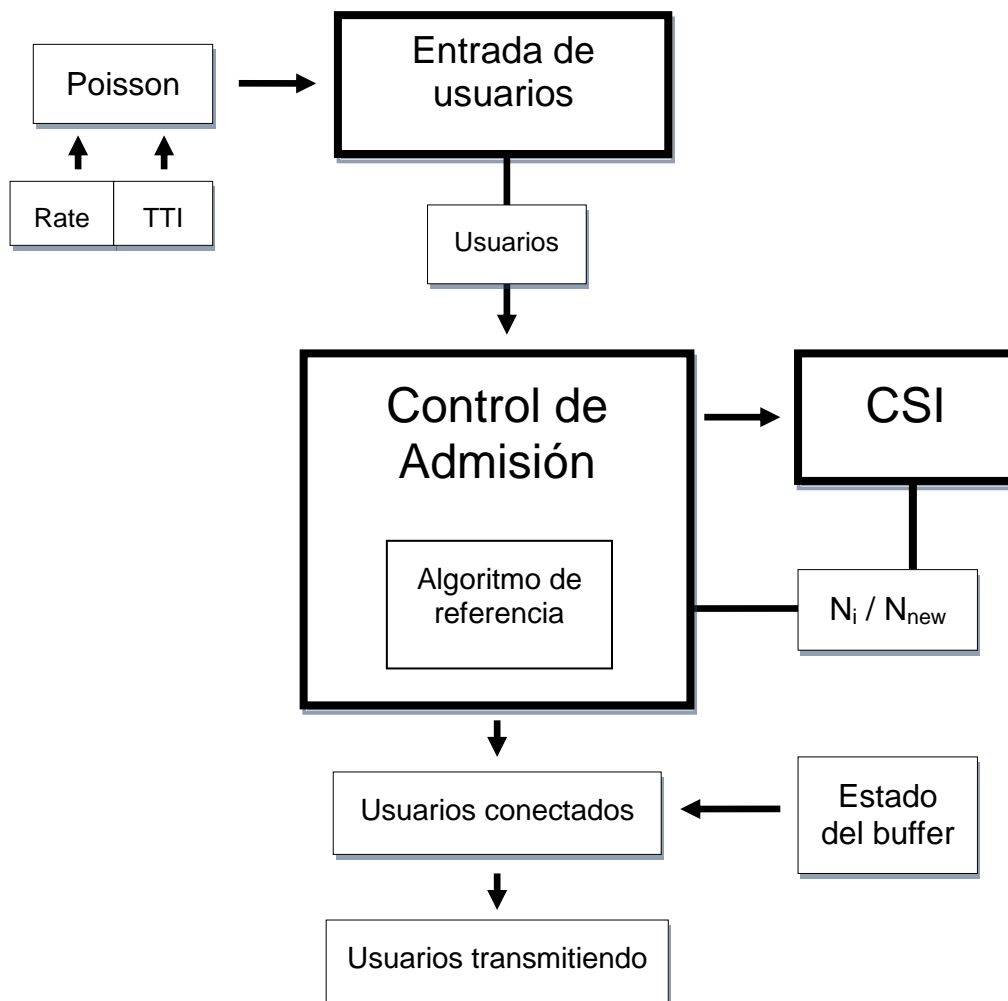


Fig.3.6 Procedimiento de admisión de usuarios en el control de admisión.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Una vez explicados los procedimientos seguidos en el simulador, el siguiente paso es recoger resultados para evaluar el funcionamiento de los algoritmos estudiados. Por tanto, los resultados analizados se centrarán en aquellos bloques incorporados en este proyecto, es decir, el algoritmo de control de admisión basado en SRS y la asignación de anchos de banda para el sondeo del canal en la situación en que el número de usuarios es superior a los bloques de sondeo disponibles para la asignación.

Para obtener outputs que representen correctamente el funcionamiento del sistema, las simulaciones se realizan durante el tiempo necesario para poder sobrepasar unos ciertos TTIs de inestabilidad provocados por procesos de inicialización como el *sounding*, que requiere de una cierta cantidad de TTIs para llegar a sondear todo el ancho de banda, o el *scheduler* temporal, que necesita cierto período de tiempo para realizar una ordenación de usuarios justa; y al mismo tiempo poder simular durante un cierto tiempo el funcionamiento del sistema de AC para permitir a los usuarios que terminen con sus transmisiones.

Los parámetros de simulación se resumen en la tabla 4.1. El rate de llegada de usuarios y el tamaño del buffer, son parámetros característicos del AC. En este caso se ha tomado este valor de buffer para que dada la configuración de la simulación se consiga que la mayoría de usuarios conectados acaben la transmisión. En cuanto a los valores del rate de llegada de usuarios, son valores muy altos en comparación con la realidad, sin embargo son interesantes en el sentido de llevar el sistema al límite de las capacidades, simulando un caso extremo.

Tabla 4.1. Parámetros de la simulación.

Parámetro	Valor
Frecuencia de la portadora	2 GHz
Ancho de banda simulado	20 MHz [80 PRB, 20 usados para control]
Símbolos SC – FDMA	6; 1 reservado para transmisiones de <i>sounding</i>
Disposición	9 emplazamientos hexagonales con 3 sectores por emplazamiento
Radio de la celda	500 m
Modelo de propagación	$L = 35,5 + 37,6 \cdot \log(d)$; d = distancia en metros
<i>Shadow fading</i>	Log – normal, 8 dB de desviación estándar
<i>Fast fading</i>	ITU Typical Urban (3km/h)
Usuarios por celda	80
Modelo de tráfico de los usuarios	<i>Buffers finitos</i>
Tamaño del <i>buffer</i>	100 kbits
Potencia máxima de transmisión por usuario	250 mW
Potencia de transmisión	250mW
<i>Scheduler</i>	Distribución según QoS
Llegada de usuarios	Poisson
Ratio de llegada de usuarios	[0.4, 0.6, 0.8, 1] Usuarios / ms
HARQ	Sincronizado y adaptativo
Control de potencia de lazo abierto	$P_0 = -60$ dBm; $\alpha = 0.6$
Retardo de transmisión (RTT)	8 ms
Objetivo de BLER	10 %
Formato AMC	Definido en tabla 2.1
Estimación del canal	Real (SRS <i>sounding</i>)
Esquema de antenas	SISO
Tiempo de simulación	1000 TTIs

4.1 Valoración de resultados

Para comprobar si los nuevos bloques implementados funcionan correctamente, se empieza evaluando el efecto del ancho de banda de sondeo respecto a los valores de la BLER obtenidos. El *sounding* realizado por el CSI tendrá un efecto directo sobre la BLER medida, ya que si se realiza una mala estimación del canal, con valores no cercanos a la realidad, el modo de transmisión seleccionado no será el adecuado y los paquetes de la transmisión se perderán.

En la figura 4.1 se realiza este cálculo para 36 usuarios. El nuevo SRS *scheduler* implementado se utiliza a partir del ancho de banda de 4 bloques de PRB. Se puede comprobar cómo los valores, pese a tener pequeñas fluctuaciones, tienen un valor constante. Esto se debe a que el nuevo *scheduler* implementado tiene unos tiempos de actualización muy parecidos al antiguo *scheduler*, tal y como se ve en la tabla 4.2, a excepción del ancho de banda 1, que posee un elevado tiempo de actualización y una baja BLER. Esto se evaluará posteriormente con las gráficas de las SINR sondeada y final.

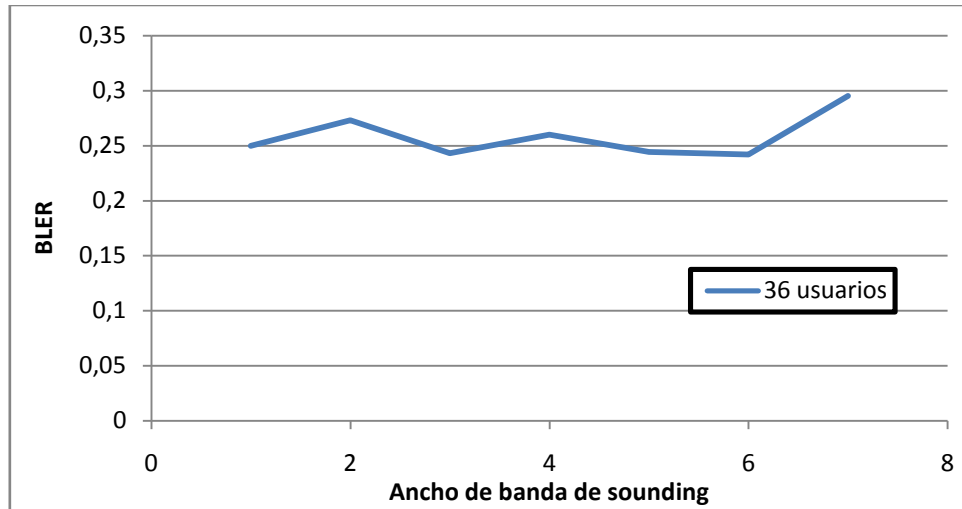


Fig.4.1 BLER en función del ancho de banda de *sounding* para 36 usuarios conectados.

Tabla 4.2. Tiempo de actualización medio para los PRBs según el ancho de banda de *sounding*.

Ancho de banda de <i>sounding</i>	Tiempo de actualización medio para un PRB
1	20
2	10
3	7
4	5
5	6
6	7
7	8

Si aumentamos el número de usuarios a 80, tal y como sucede en la figura 4.1, se puede observar como los valores de la BLER aumentan al tener que repartir el *sounding* entre un mayor número de grupos de usuarios. En ambos casos el valor de *sounding* donde se produce una menor probabilidad de pérdida de paquetes es el de un ancho de banda de 12 PRBs.

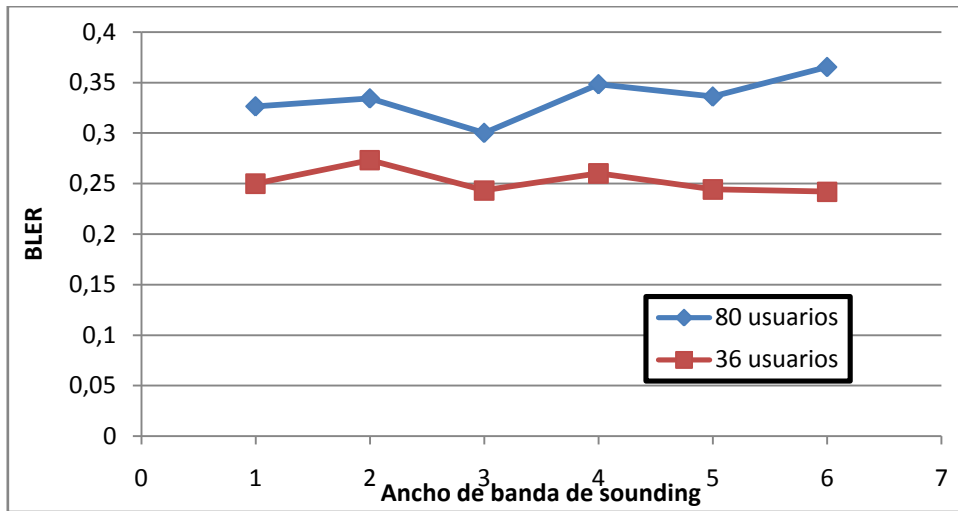


Fig.4.2 BLER en función del ancho de banda de *sounding* para 36 y 80 usuarios conectados.

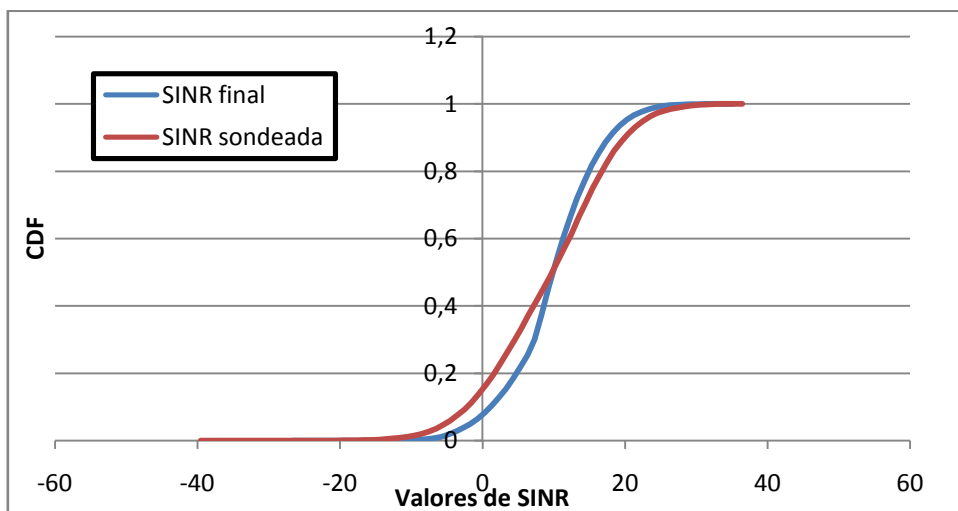


Fig.4.3 Variación entre SINR sondeado y SINR final con ancho de banda de *sounding* = 1.

Si se comparan las figuras 4.3 y 4.4, se puede comprobar como si un usuario sondea cada TTI, el ancho de banda de sondeo acerca el valor final de SINR y el sondeado. Es decir, si el usuario actualiza alguna parte de su ancho de banda cada TTI, su conocimiento del canal es mayor y los valores estimados y reales del canal serán más parecidos. Esto explica que pese a tener un bajo ratio de actualización, cuando se sondea únicamente un bloque de PRBs cada TTIs se obtienen los mismos valores de BLER que otros sistemas que reparten mejor los PRBs entre los usuarios.

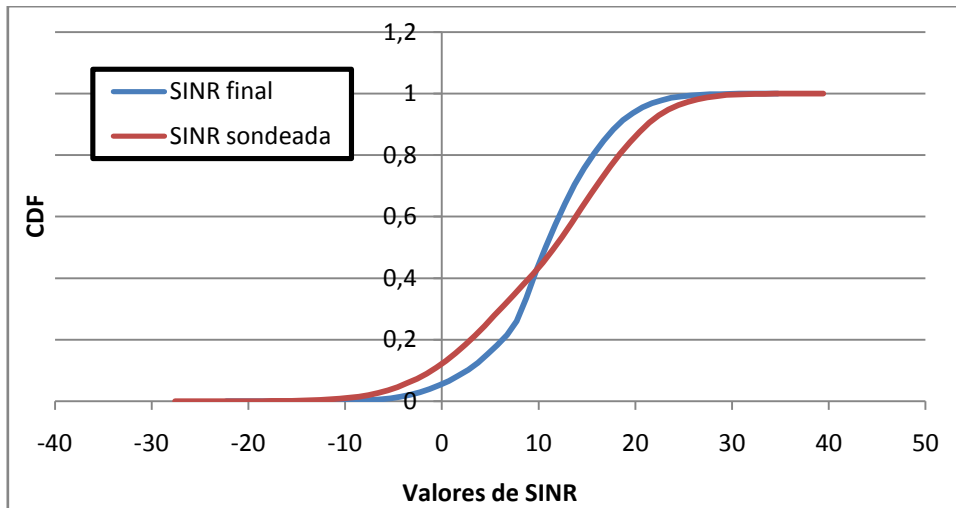


Fig.4.4 Variación entre SINR sondeado y SINR final con ancho de banda de *sounding* = 4.

Una vez comprobado el funcionamiento del bloque implementado de sondeo, se procede a valorar el funcionamiento del nuevo algoritmo de referencia basado en los SRS.

En la figura 4.5 se han tomado como variables de la gráfica los ratios de llegada de usuarios y los algoritmos de AC que regulan la entrada de usuarios al sistema. Como se puede ver, como mayor sea el *rate* de llegada de usuarios, mayor será el número de usuarios conectados, debido a que, siempre que lo permita el AC, como más usuarios quieran entrar en la base, más posibilidades hay de que estos usuarios acaben conectándose.

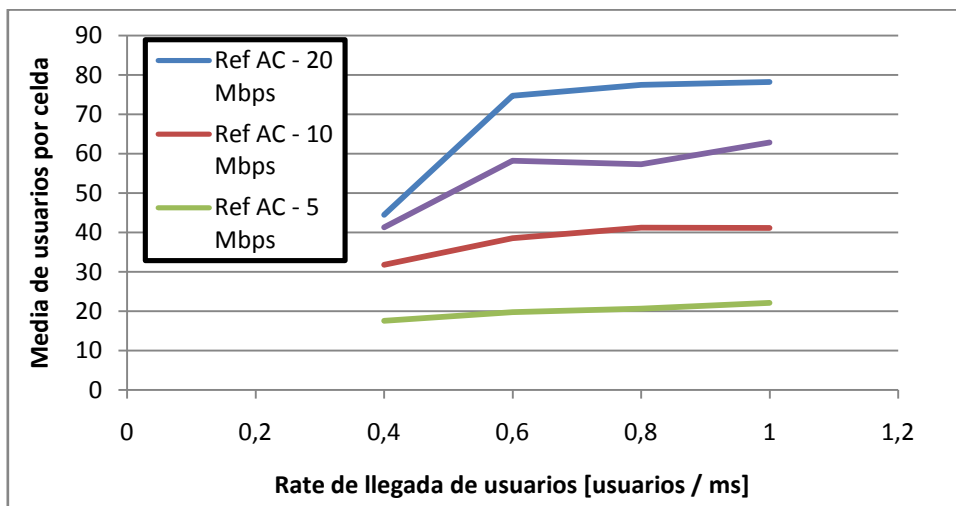


Fig. 4.5 Media de usuarios por celda en función de los *rates* de llegada y el algoritmo de AC aplicado.

Los algoritmos de referencia implementados demuestran que como mayor sea el valor de R_{\max} , mayor será el número de usuarios que entrarán al sistema, ya que se permite la entrada de los usuarios al eNB hasta que se alcanza el R_{\max} . De esta manera, si el valor de R_{\max} tendiera a infinito, estaríamos en la misma situación que si no tuviéramos ningún AC implementado. Por lo que hace el SRS AC, se trata de un algoritmo más conservador que el presentado por R_{\max} de 20 Mbps, ya que tiene en cuenta el QoS de las comunicaciones de los usuarios y, por ello, es más restrictivo a la hora de aceptar usuarios en el eNB.

Lógicamente, si el número de usuarios admitidos en el sistema aumenta, la probabilidad de recibir recursos del eNB cada TTI se reduce. Aunque no es necesario recibir recursos cada TTI para cumplir el GBR, bien es cierto que la probabilidad de cumplirlo se reduce. Además, el *scheduler* frecuencial asigna un ancho de banda fijo de 10 PRBs, con lo que si un usuario tiene malas condiciones del canal necesitará recurrir a estos recursos de manera continuada.

Como se muestra en la figura 4.6, como mayor sea la cantidad de usuarios conectados al eNB menor será la probabilidad de los usuarios de recibir recursos para transmitir. Esto se debe a que como mayor sea el número de usuarios de la base, mayor será también la cantidad de usuarios que entrarán en el PS y entre los que habrá que repartir los recursos disponibles.

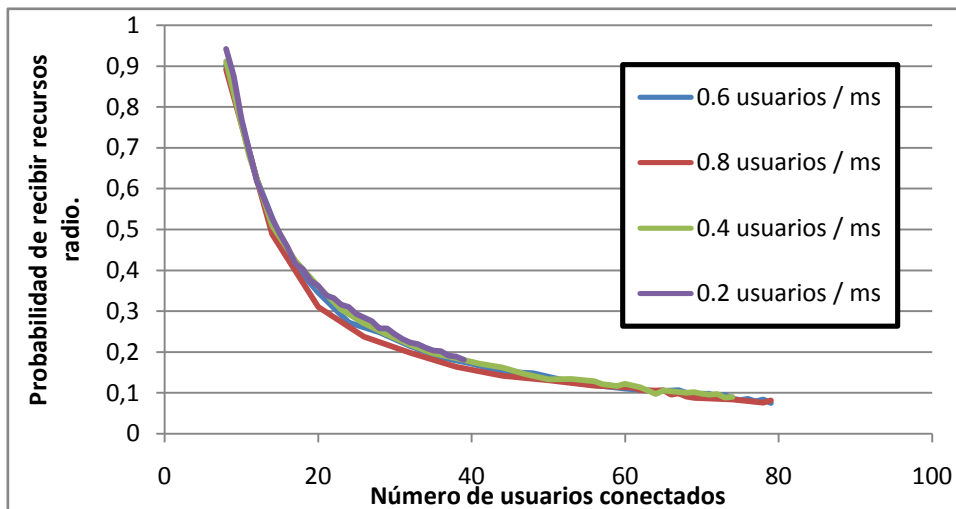


Fig.4.6 Probabilidad de recibir recursos radio en función del número de usuarios conectados.

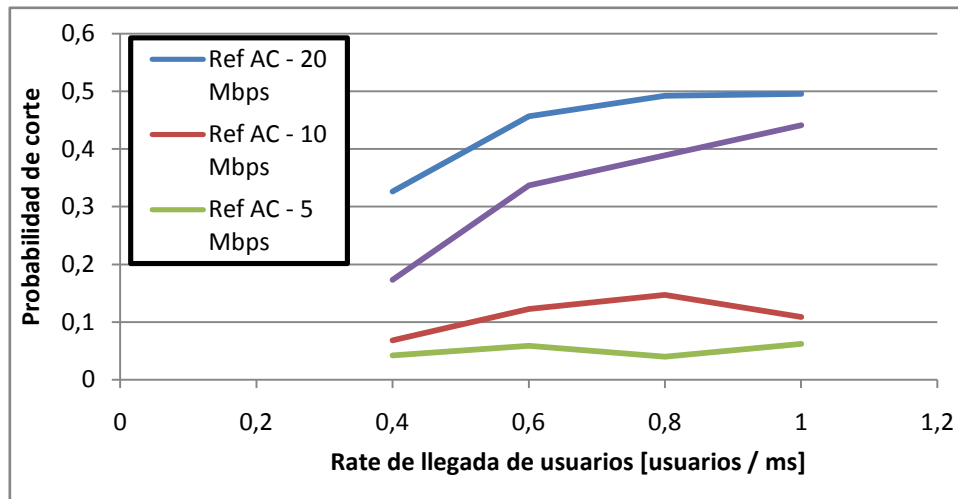


Fig. 4.7 Probabilidad de corte u *outage*.

En la figura 4.7 se verifica que si el número de usuarios conectados es muy alto, la probabilidad de recibir recursos que permitan cumplir con el GBR se reduce. Para ACs más restrictivos, donde el número de usuarios conectados es bajo, es más fácil recibir recursos y, por lo tanto, es más fácil tener valores de *outage* más bajo. Sin embargo, en la comparación de celdas cargadas, como en el caso de algoritmo de referencia con valores 20 Mbps de R_{\max} y el de SRS AC, este último cumple mejor el *outage*. Cabe remarcar que estos valores altos de *outage* son producidos por la elevada cantidad de usuarios conectados a la base, ya que si nos fijamos en los casos en los que el *rate* de llegada de usuarios es más bajo, como en el caso de 0.4, los valores se reducen cuantitativamente, obteniendo para el SRS AC una reducción del 50% de la probabilidad de corte. En todo caso, estos *rates* son muy altos para evaluar la reacción del sistema en los casos más extremos, en situaciones normales la probabilidad de *outage* tiende a 0.

Otra manera de demostrar que como mayor sea el número de usuarios conectados, menor será la probabilidad de recibir recursos es comparar la duración de las transmisiones en función del AC aplicado. Tal y como se ve en la figura 4.8, como mayor sea el número de usuarios conectados al eNB, más tiempo tardarán las transmisiones en realizarse.

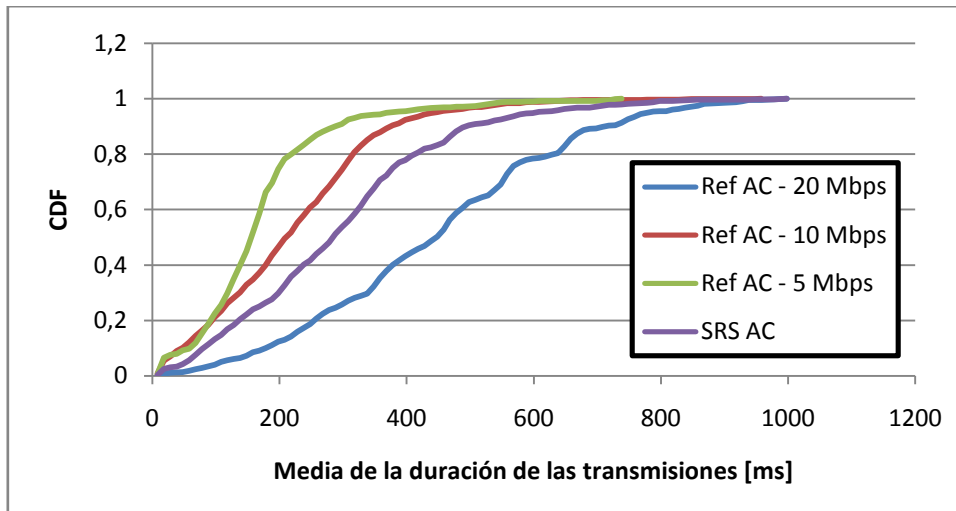


Fig. 4.8 CDF de la media de duración de las transmisiones terminadas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones del trabajo

En este proyecto se ha implementado un control de admisión de usuarios en un simulador LTE. En esta memoria se ha procedido a explicar el funcionamiento de la tecnología de comunicación móvil LTE y, concretamente, las diversas funcionalidades de gestión de recursos propias de esta tecnología,

El control de admisión implementado funciona a través un algoritmo de entrada de usuarios que acepta o deniega esta inclusión al sistema en función de la calidad del servicio requerida por el usuario que puede ser abastecida por el eNB manteniendo la calidad del servicio a todos los usuarios ya conectados en el sistema.

Para realizar esta incorporación al sistema se han tenido que modificar muchas partes del simulador, como por ejemplo el reparto de anchos de banda a sondear entre un elevado número de usuarios, la diferenciación entre usuarios conectados o desconectados al sistema y la implementación de distintos parámetros inexistentes de los usuarios como el buffer restante para transmitir o la calidad de servicio requerida.

Tal y como se ha podido observar en los resultados, la implementación de los distintos bloques en el sistema se ha producido correctamente y no ha afectado al correcto funcionamiento del simulador. Además, estas modificaciones han aportado una mayor similitud a los casos reales del sistema LTE, como en el caso de tener usuarios desconectados en el sistema.

5.2 Valoración personal

La elección de este proyecto tenía como objetivo trabajar en una tecnología en la cual tengo mucho interés y que, por limitaciones de tiempo, no pudo ser mostrada en la asignatura de comunicaciones móviles.

El proyecto realizado me ha aportado no solo unos conocimientos sobre esta tecnología, sino que también me ha enseñado una manera de enfrentar los proyectos muy distinta a como lo había hecho hasta ahora: la comprensión de un sistema casi desconocido, la búsqueda de información, el método de trabajo, la obtención de resultados, etc. Son muchas cosas que este proyecto me ha aportado y que no creo que de otra manera pudiera haber asimilado.

El proyecto, al basarse en un programa ya empezado, me ha permitido tener una base a la hora de programar y a la hora de afrontar el proyecto he tenido cierta libertad a la hora de solucionar los problemas, pero, por otro lado, la comprensión del simulador hecho ha requerido un esfuerzo superior al esperado. En todo caso, la programación que yo veía como una cosa a evitar a la hora de escoger trabajos o proyectos, ahora se me presenta como una herramienta que permite facilitar la comprensión y realización de complejas funcionalidades.

Finalmente, me gustaría destacar que pese a ser una gran carga de trabajo a lo largo de estos últimos 6 meses, sino hubiera tenido que finalizar el proyecto por limitaciones temporales para entrar en la ingeniería superior de telecomunicaciones, me gustaría haber podido acabar con las implementaciones que se querían realizar inicialmente en el proyecto.

5.3 Trabajos futuros

La idea inicial de este proyecto era, una vez implementado el control de admisión, crear distintos tipos de tráfico según el tipo de transmisión que los usuarios debían realizar y valorar su inclusión en la celda según el control de admisión, pero por limitación de tiempo no se ha podido incorporar. Esto supondría un trato distintivo de los usuarios en todos los bloques del sistema según su tipo de tráfico. Ligado al tema anterior, se podría en un futuro incorporar al sistema unos buffers que dependieran de estos tipos de tráfico y que se vieses modificados en el transcurso de la transmisión.

Tal y como se ha visto en el apartado de resultados, también sería interesante implementar un *scheduler* frecuencial que asignara la cantidad de recursos radio que se asignan a un usuario en función de los requeridos para cumplimentar su QoS. En todo caso, este simulador permite implementar fácilmente las características básicas de la tecnología LTE al sistema, por lo tanto, la implementación de otro tipo de antenas, la inclusión de transmisiones *downlink* o la gestión de los usuarios según su tarifa contratada, son ejemplos de muchas de las posibles implementaciones que se podrían realizar para el simulador.

5.4 Estudio ambiental

La realización de este proyecto ha supuesto el uso continuo de 1 a 3 ordenadores para realizar las simulaciones. El impacto ambiental no es muy grande ya que estos ordenadores habitualmente ya están encendidos, pero su impacto se podría reducir apagándolos entre simulación y simulación.

El impacto medioambiental de una nueva tecnología de comunicación móvil es muy alta: las estaciones base, las antenas, las redes de comunicación, la adaptación de los terminales móviles, etc. Por suerte, al ser LTE una evolución de las tecnologías actuales y ser creada con el objetivo de reutilizar las redes de comunicación, su impacto medioambiental y, como ya se ha comentado, económico, no es tan alto como lo podría ser otra tecnología, pese a ello, cualquier modificación, como el tipo de antena, al ser un cambio generalizado para todos los países, conlleva un impacto medioambiental muy alto y requiere que se tenga en cuenta en la elección de estos nuevos elementos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cabrejas Peñuelas, J., Calabuig Soler, D., Cardona, N., Fernández Aguilera, A., García Lozano, M., González G., D., Martín-Sacristán Gandía, D., Montserrat, J.F., Olmos Bonafé, J.J. & Ruiz Boqué, S. 2011, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Marcombo, Barcelona.
- [2] Misar, P. 2010, "Wireless LTE deployment: How it is changing cell site energy and infrastructure design", *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 32nd International IEEE*, pp. 1.
- [3] A. Toskala, H. Holma, K. Pajukoski, and E. Tirola, "UTRAN Long Term Evolution in 3GPP", *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2006.
- [4] Pagès, A.S. 2009, *A Long Term Evolution Link Level Simulator*.
- [5] Lema, M.A., García Lozano, M., Olmos Bonafé, J.J. & Ruiz Boqué, S. 2011, "Uplink system and link level simulation of 3GPP-LTE Rel. 8".
- [6] Anas, M. 2009, *Uplink Radio Resource Management for QoS Provisioning in Long Term Evolution*.
- [7] Holma, H. & Toskala, A. 2009, *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access*, John Wiley & Sons Inc.
- [8] Churchman Barata, M.W. 2011, "LTE performance evaluation with realistic channel quality indicator feedback",.
- [9] 3GPP Technical Specification 36.101, 'User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (Release 8)', www.3gpp.org.
- [10] Sesia, S., Toufik, I. & Baker, M. 2009, "LTE—The UMTS Long Term Evolution", *From Theory to Practice, published in*, vol. 66.

