

## UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

#### FACULTAD DE INGENIERÍA



## ESCUELA DE TELECOMUNICACIONES

# PLANIFICACIÓN DE UNA RED LTE CON LA HERRAMIENTA ATOLL Y ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS ESTRATEGIAS DE PACKET SCHEDULING

## TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

## UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

## INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR: Cristina Eugenia Guinand Salas

PROFESOR GUÍA: Mayra Narváez

TUTOR: Anna Umbert Juliana

FECHA: Septiembre de 2012



## UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

## FACULTAD DE INGENIERÍA



## ESCUELA DE TELECOMUNICACIONES

# PLANIFICACIÓN DE UNA RED LTE CON LA HERRAMIENTA ATOLL Y ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS ESTRATEGIAS DE PACKET SCHEDULING

REALIZADO POR: Cristina Eugenia Guinand Salas

PROFESOR GUÍA: Mayra Narváez

TUTOR: Anna Umbert Juliana

FECHA: Septiembre de 2012



## UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

## FACULTAD DE INGENIERÍA



## ESCUELA DE TELECOMUNICACIONES

# PLANIFICACIÓN DE UNA RED LTE CON LA HERRAMIENTA ATOLL Y ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS ESTRATEGIAS DE PACKET SCHEDULING

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su

contenido con el resu	ıltado:		
	JURADO	EXAMINA	A D O R
Firma	Firma		Firma:
Nombre: Nombre:			Nombre:
REALIZA	DO POR:	Cristina Eug	genia Guinand Salas
PROFESO	R GUÍA:	Mayra Narv	/áez
TUTOR:		Anna Umbe	ert Juliana
FECHA:		Septiembre	de 2012

## **DEDICATORIA**

Le dedico con mucho cariño este trabajo a mi país, Venezuela, que me ha dado lo mejor y a quién espero retribuirle con mis conocimientos para hacer de él un mejor país.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mi tutora y profesora Anna Umbert por su disposición, dedicación y orientación a lo largo de este proyecto.

Quiero agradecer a Sergio por estar siempre dispuesto a ayudarme.

A mi familia y otros seres queridos que a pesar de la lejanía me han apoyado día a día y han contribuido muy positivamente al logro de esta etapa de mi vida.

Quiero agradecer también a todos los que han compartido conmigo las alegrías y dificultades de este trabajo y se han atrevido a escuchar y aportar ideas muy valiosas.

Por último quiero agradecer a Dios por estar siempre presente en mi vida y darme la fuerza y motivación necesarias para seguir adelante en todo momento.

## **RESUMEN**

Al surgir el sistema LTE de cuarta generación de telefonía móvil y además hacerse disponible en el mercado herramientas que permiten modelar estas redes, surgió la necesidad de extender los conocimientos teóricos al ámbito práctico para observar el comportamiento de estas redes bajo diferentes condiciones y establecer comparaciones con los resultados esperados. En este sentido, el presente Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo la planificación de una red LTE en la herramienta ATOLL para crear situaciones que permitan analizar el rendimiento de la red al emplear distintas estrategias de *Packet Scheduling*.

La metodología utilizada en el proyecto consistió en una primera fase de investigación teórica, no solo de las especificaciones del sistema LTE sino también de los algoritmos empleados en el programa para llevar a cabo los distintos cálculos necesarios referentes a las funciones de gestión de los recursos radios y obtención de los throughputs por usuario, por celdas y totales de la red. Posteriormente se emprendió la fase de planificación de la red LTE escogiendo la ciudad de Barcelona como zona para el despliegue, se procedió a la optimización de la red y finalmente se realizaron distintas simulaciones y predicciones para evaluar las estrategias Round Robin, Proportional Fair, Proportional Demand y Maximum C/I.

Como resultado general del proyecto se logró alcanzar un alto dominio de la herramienta ATOLL en la planificación de redes LTE, así como obtener el criterio para evaluar y establecer parámetros del programa según valores realistas que permitan obtener resultados acorde a los documentos teóricos.

Palabras claves: LTE, *Packet Scheduling*, *throughput*, recursos radio, planificación radio, ATOLL.

## **ABSTRACT**

With the rise of LTE fourth generation mobile communication system as well as the availability of radio planning tools on the market to model these networks, a need arose to merge a theoretical knowledge of LTE systems with the practical field in order to observe the behavior of these networks under different conditions and to establish comparisons with the expected results. In this respect, this Final Career Project aims to plan an LTE network in the ATOLL software to create situations to analyze the network performance by using different Packet Scheduling strategies.

The methodology used in the project consisted of several phases. In the research phase, investigation was made into both the LTE system specifications and the algorithms used in ATOLL to perform calculations concerning radio resource management and obtainment of the throughputs per user, per cell, and for the total network. In the subsequent planning phase, Barcelona was chosen as the area for deployment. In the third phase of the project, actions were taken to optimize the network. In the last phase simulations and predictions were made to evaluate the Packet Scheduling Strategies: Round Robin, Proportional Fair, Proportional Demand, and Maximum C/I.

As a result of the project, a high level of proficiency in ATOLL use was achieved regarding the planning of LTE networks as well as an understanding of the criterion for evaluating and setting program parameters in order to obtain realistic values according to theoretical documents.

Keywords: LTE, Packet Scheduling, throughput, radio resource, radio planning, ATOLL.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	Г
RESUMEN	II
ABSTRACT	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	
LISTA DE ACRÓNIMOS	
INTRODUCCIÓN	XVI
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
I.1 Planteamiento del Problema	<i>1</i>
I.2 Objetivos	<i>1</i>
I.2.1 Objetivo General	
I.2.2 Objetivos específicos	
I.3 Justificación	2
I.4 Limitaciones y alcances	
I.4.1 Limitaciones	
I.4.2 Alcances	3
CAPÍTULO II	5
MARCO REFERENCIAL	5
II.1 Sistemas móviles de cuarta generación (4G)	5
II.2 Sistema LTE	7
II.2.1 Acceso múltiple multiportadora	8
II.2.2 Arquitectura del sistema	9
II.2.2.1 Red de acceso E-UTRAN	
II.2.2.2 Red troncal EPC	11
II.3 Packet Scheduling	
II.3.1 Downlink y Uplink Packet Scheduling	
II.3.2 Dominio temporal y frecuencial del Packet Scheduling	
II.3.3 Scheduling semi-persistente	
II.3.4 Estrategias de Packet Scheduling	
II.3.4.1 Round Robin (RR)	
II.3.4.2 Proportional Fair (PF)	
II.3.4.3 Proportional Demand (PD)	
II.3.4.4 Maximun C/I (Max C/I)	19

CAPÍTUI	LO III	21
METOL	OOLOGÍA	21
III.1	Investigación teórica	
III.2	Aprendizaje de la herramienta ATOLL	21
III.3	Planificación y optimización de la red LTE en ATOLL	
III.4	Procesado de los datos y análisis	
CAPÍTUI	LO IV	23
DESAR	ROLLO	23
IV.1	Aprendizaje de la herramienta ATOLL	23
IV.	1.1 Diseño de una red LTE en ATOLL	
IV.	1.2 Predicciones de Cobertura	26
IV.	1.3 Simulaciones Monte Carlo	28
IV.	1.4 Detalle de los cálculos referentes al scheduling y RRM	31
	1.5 MIMO (Multiple Input Multiple Output) Systems	
<i>IV.2</i>	Planificación de la red LTE en ATOLL	48
IV.	2.1 Despliegue de la red	48
IV.	2.2 Configuración del modelo de propagación	51
IV.	2.3 Configuración de servicios, terminales, movilidades y perfiles de usuar	io
	51	
IV.	2.4 Estudios de cobertura por nivel de señal	54
<i>IV.3</i>	Optimización de la red LTE	55
IV.	3.1 Mapas de tráfico	55
IV.	3.2 Asignación de vecinos	57
IV.	3.3 Planificación de frecuencias	57
IV.	3.4 Planificación del Physical Cell ID	57
IV.	3.5 Estudios de cobertura por calidad de señal	57
CAPÍTUI	20 V	59
SIMUL	ACIONES, RESULTADOS Y ANÁLISIS	59
V.1	Comparación de las estrategias de Packet Scheduling sin simulaciones na	
optim	ización de la red	59
V.2	Comparación de la capacidad antes y después de optimizar	66
V.2	2.1 Comparación usando un canal de 5 MHz vs. tres canales de 5 MHz	66
V.2	2.2 Comparación usando tres canales de 5 MHz vs. un canal de 15 MHz	70
V.3	Comparación de las estrategias de Packet Scheduling con simulaciones	78
V.3	3.1 Primer grupo de predicciones con simulaciones	78
V.3	3.2 Segundo grupo de predicciones con simulaciones	85
V.3	3.3 Tercer grupo de predicciones con simulaciones	93
V.4	Modificación de la configuración de la red LTE	96
V.4	1 Primer grupo de simulaciones	. 98

V.4.2 Segundo grupo de simulaciones
V.5 Ajuste de las ganancias de diversidad multiusuario (MUG) para la estrategia
PF 101
V.6 Estudio de los parámetros de los schedulers en ATOLL
V.6.1 Estudio del Target Throughput for Voice/Data Services
V.6.2 Estudio del Bearer Selection Criterion
V.6.3 Estudio del Uplink Bandwidth Allocation Target
V.7 Impacto de emplear diversidad en transmisión y recepción para cada
estrategia de Packet Scheduling114
V.8 Impacto de emplear diversidad SU-MIMO para cada estrategia de Packet
Scheduling11
V.9 Impacto de emplear diversidad AMS para cada estrategia de Packet
Scheduling
V.10 Impacto de emplear diversidad MU-MIMO para cada estrategia de Packet
Scheduling
CAPÍTULO VI130
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
CAPÍTULO VII13
BIBLIOGRAFÍA

PLANIFICA	CIÓN DE UNA IMPACTO DE			ISIS DEL

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Estándares de comunicaciones móviles.	6
Figura 2.2: Dominio frecuencial de las tecnologías de acceso múltiple de LTE	9
Figura 2.3: Arquitectura de red LTE.	10
Figura 2.4: Scheduling de paquetes en OFDMA (downlink).	13
Figura 2.5: Physical Resource Blocks de LTE.	14
Figura 2.6: Esquema funcional para scheduling en LTE.	15
Figura 2.7: Efecto de la diversidad multiusuario en el Packet Scheduling	16
Figura 4.1: Diagrama de flujo del diseño de una red LTE en ATOLL.	25
Figura 4.2: Algoritmo de las simulaciones LTE en ATOLL	31
Figura 4.3: Computation Zone de la red LTE.	50
Figura 4.4: Resultado de la predicción Coverage by Signal Level	54
Figura 4.5: Bearer selection thresholds para todas las movilidades de la red LTE	56
Figura 5.1: Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Cover	age
by Throughput DL	62
Figura 5.2: Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Cover	age
by Throughput UL	63
Figura 5.3: Comparación de la estrategia RR entre los cuatro grupos de predicciones en	ı el
DL	64
Figura 5.4: Comparación de la estrategia RR entre los cuatro grupos de predicciones en	$\iota$ $el$
<i>UL.</i>	65
Figura 5.5: Comparación de la capacidad de la red sin optimización y con optimización	en
el DL.	68
Figura 5.6: Comparación de la capacidad de la red sin optimización y con optimización	en
el UL.	69
<b>Figura 5.7:</b> Coverage by Throughput DL con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz	
respectivamente.	71
<b>Figura 5.8:</b> Coverage by Throughput UL con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz	
respectivamente	72
<b>Figura 5.9:</b> <i>PDSCH Total Noise (I+N) con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz</i>	
respectivamente	
<b>Figura 5.10:</b> PUDSCH & PUCCH Total Noise (I+N) con 3 canales de 5 MHz y 1 canal	de
15 MHz respectivamente	
Figura 5.11: Comparación de la capacidad de la red en el DL entre 3 canales de 5 MHz	•
canal de 15 MHz.	
Figura 5.12: Comparación de la capacidad de la red en el UL entre 3 canales de 5 MHz	-
canal de 15 MHz.	
Figura 5.13: Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Cove	U
by Throughput DL	80

Figura 5.14: Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage
by Throughput UL80
Figura 5.15: Coverage by Throughput DL para RR (izquierda) y PF (derecha) 81
Figura 5.16: Coverage by Throughput UL para RR (izquierda) y PF (derecha)82
Figura 5.17: Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage
by Throughput DL (aumentando la densidad de usuarios)
Figura 5.18: Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage
by Throughput UL (aumentando la densidad de usuarios)
Figura 5.19: Coverage by Throughput DL para RR (izquierda) y PF (derecha) (aumentando
la densidad de usuarios)
Figura 5.20: Coverage by Throughput UL para RR y PF respectivamente (aumentando la
densidad de usuarios)
Figura 5.21: Predicción Coverage by Throughput DL para RR junto al resultado de la
simulación92
Figura 5.22: Predicción Coverage by Throughput DL: Simulation Effective RLC Aggregate
Throughput
Figura 5.23: Predicción Coverage by Throughput UL: Simulation Effective RLC Aggregate
Throughput
Figura 5.24: Configuración inicial de la red LTE junto al mapa de tráfico97
Figura 5.25: Nueva configuración de la red LTE junto al mapa de tráfico
Figura 5.26: Valores por defecto de ATOLL de MUG en función del número de usuarios. 101
Figura 5.27: Influencia del tipo de estrategia en la eficiencia espectral por usuario 103
Figura 5.28: Nuevos valores de MUG en función del número de usuarios

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Predicciones de cobertura disponibles en ATOLL.	27
Tabla 4.2: Demandas de throughput para Target = Peak RLC Throughput	35
Tabla 4.3: Demandas de throughput para Target = Effective RLC Throughput	36
Tabla 4.4: Demandas de throughput para Target = Application Throughput.	36
Tabla 4.5: Parámetros de la Plantilla LTE.	
Tabla 4.6: Parámetros del modelo de propagación Cost-Hata.	51
Tabla 4.7: Parámetros de los servicios de la red LTE.	
Tabla 4.8: Características de los terminales de la red LTE.	53
Tabla 4.9: Tipos de movilidad de usuarios de la red LTE.	53
Tabla 4.10: Características de los perfiles de usuarios de la red LTE	
Tabla 4.11: Parámetros de los entornos de la red LTE.	
Tabla 4.12: Características de los Radio Bearers de la red LTE.	56
<b>Tabla 5.1:</b> Parámetros de las celdas para los grupos de predicciones del apartado V.1.	
Tabla 5.2: Demandas de las simulaciones del apartado V.3.1.	
Tabla 5.3: Estadísticas de las simulaciones del apartado V.3.1.	83
Tabla 5.4: Demandas de las simulaciones del apartado V.3.2.	
Tabla 5.5: Estadísticas de las simulaciones del apartado V.3.2	
Tabla 5.6: Demandas de las simulaciones del apartado V.4.1.	99
Tabla 5.7: Estadísticas de las simulaciones del apartado V.4.1.	
Tabla 5.8: Demandas de las simulaciones del apartado V.4.2.	
Tabla 5.9: Estadísticas de las simulaciones del apartado V.4.2.	
Tabla 5.10: Estadísticas de las simulaciones de la Tabla 5.7 con nuevos valores de MU	
para PF	104
<b>Tabla 5.11:</b> Estadísticas de las simulaciones de la Tabla 5.9 con nuevos valores de MU	G
para PF	105
Tabla 5.12: Demandas para todas las simulaciones del apartado V.6	106
Tabla 5.13: Estadísticas de las simulaciones para el estudio del target throughput for	
voice/data services	108
<b>Tabla 5.14:</b> Estadísticas de las simulaciones para el estudio del target bearer selection	
criterion.	110
Tabla 5.15: Estadísticas de las simulaciones para el estudio del uplink bandwidth alloca	ation
target	
Tabla 5.16: Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad en	
transmisión y recepción	
<b>Tabla 5.17:</b> Resultados de las simulaciones con diversidad en transmisión y recepción.	118
<b>Tabla 5.18:</b> Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad S	
<i>MIMO</i>	
Tabla 5.19: Resultados de las simulaciones con diversidad SU-MIMO	121

Tabla 5.20: Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad A	MS.
	122
Tabla 5.21: Resultados de las simulaciones con diversidad AMS.	124
<b>Tabla 5.22:</b> Comparación de los resultados por móviles al emplear AMS con distintas	
cantidades de antenas transmisoras y receptoras.	127
Tabla 5.23: Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad M	IU-
<i>MIMO</i>	128
Tabla 5.24: Resultados de las simulaciones con diversidad MU-MIMO.	129
Tabla 5.25: Comparación de los Traffic Loads UL sin diversidad y con MU-MIMO	129
Error! Bookmark not def	ined

## LISTA DE ACRÓNIMOS

1G Primera Generación

2G Segunda Generación

2.5G Generación 2.5

3G Tercera Generación

3GPP Third Generation Paterntship Project

3GPP2 Third Generation Paterntship Project 2

4G Cuarta Generación

AFP Automatic Frequency Planning

AMS Adaptative MIMO Switch

AS Access Stratum

BER Bit Error Rate

BLER Block Error Rate

BSC Base Station Controller

BSR Buffer Status Report

BTS Base Transceiver Station

CDF Cumulative Distribution Function

CDMA Code Division Multiple Access

CS Coding Scheme

DL Downlink

E-UTRAN Evolved- UMTS Terrestrial Radio Access Network

EDGE Enhanced Data Rates for Global Evolution

eNB Evolved Node B

EPC Evolved Packet Core

EPRE Energy per Resource Element

EPS Evolved Packet System

FDD Frequency Division Duplex

FFT Fast Fourier Transform

GPRS General Packet Radio Services

GSM Global System for Mobile Communications

HSPA High Speed Packet Access
HSS Home Subscriber Server

ICIC Inter-Cell Interference Coordination

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFFT Inverse FFT

IMS IP Multimedia Subsystem

IMT International Mobile Telecommunications

IP Internet Protocol

ISI Inter-Symbol Interference

ITU International Telecommunication Union

ITU-R ITU Radiocommunication Sector

LTE Long Term Evolution

MAC Media Access Control

MCS Modulation and Coding Scheme

MIMO Multiple Input Multiple Output

MME Mobility Management Entity

MRC Maximum Ratio Combining

MU-MIMO Multiple-User MIMO

MUG Multi-User Gain

NAS Non Access Stratum

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

P-GW Packet Data Network Gateway
PAPR Peak-to-Average Power Ratio

PCRF Policy Control and Charging Rules Function

PCU Packet Control Unit

PD Proportional Demand

PDCCH Physical Downlink Control Channel
PDSCH Physical Downlink Shared Channel

PF Proportional Fair

PRB Physical Resource Block

PUCCH Physical Uplink Control Channel
PUSCH Physical Uplink Shared Channel

QoS Quality of Service

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying

RLC Radio Link Control

RNC Radio Network Controller

RR Round Robin

RRM Radio Resource Management

RSRP Received Reference Signal Energy per Resource Element

S-GW Serving Gateway

SC-FDMA Single Carrier- Frequency Division Multiple Access

SINR Signal to Interference plus Noise Ratio

SRB Scheduler Resource Block
SRS Sounding Reference Signals

SU-MIMO Single-User MIMO

TDD Time Division Duplex

TTI Transmission Time Interval

UE User Equipment

UL Uplink

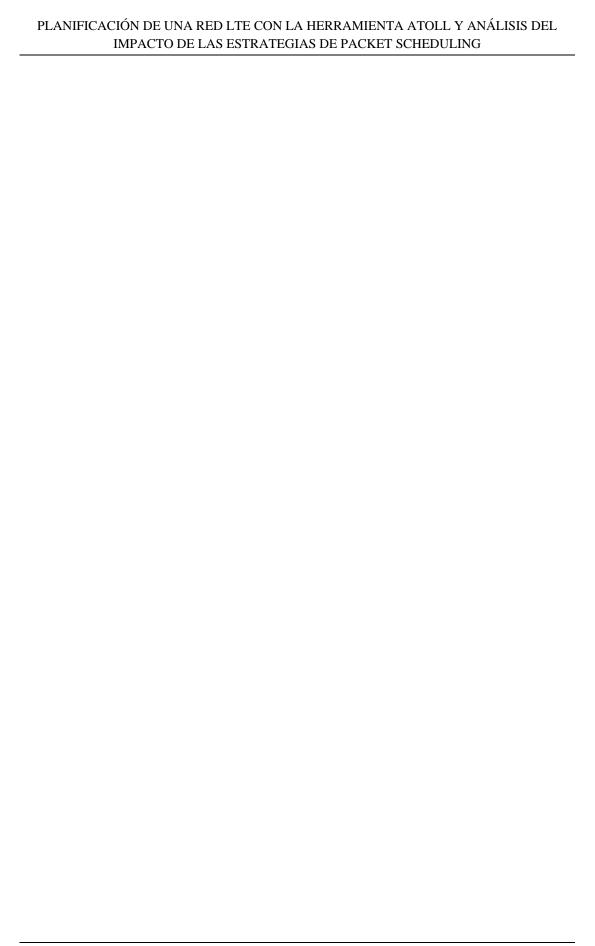
UMB *Ultra Mobile Broadband* 

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

UTRAN UMTS Terrestrial Radio Access Network

VoIP Voice over Internet Protocol

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access



## INTRODUCCIÓN

La evolución de los sistemas de telefonía móvil ha sido un proceso que ha visto en pocos años la introducción de múltiples avances tecnológicos que han permitido que sean cada vez más las personas que hacen uso del teléfono celular como dispositivo indispensable en sus vidas cotidianas. Así pues, imaginar hoy en día un mundo sin las telecomunicaciones sería pensar en otro planeta completamente diferente al que vivimos actualmente. Nuevas técnicas de codificación, multiplexación, cifrado, acceso, etc., han permitido que la telefonía móvil haya pasado de ser un servicio de voz, como lo era en un principio, a uno que ofrece una amplia gama de aplicaciones multimedia que permiten las comunicaciones en tiempo real, a altas velocidades de transmisión e incluso con altas posibilidades de movimiento.

Long Term Evolution (LTE) es el nombre que la 3GPP ha dado a la línea evolutiva que abarca los sistemas de comunicaciones móviles GSM, GPRS, EDGE, UMTS y HSPA, y que con la idea de culminar en LTE-Advanced, se caracteriza por ser un sistema de cuarta generación. Con ello se plantea en un comienzo, entre varios objetivos, alcanzar velocidades pico en la interfaz radio por encima de los 100 Mbps en el enlace descendente y de los 50 Mbps en el ascendente. Además, debe operar completamente en modo paquete ofreciendo todos los servicios sobre el protocolo IP, reducir los tiempos de latencia y permitir canalizaciones flexibles de hasta 20 MHz.

Por la gran cantidad de variables inherentemente presentes en una red de comunicaciones móviles, como lo son las interferencias, movilidades de los usuarios, servicios demandados, condiciones de propagación, entre otras, aunado al hecho de que LTE es un sistema que opera completamente en modo paquete, es indispensable disponer de un mecanismo que permita compartir de forma organizada los recursos radio entre los usuarios. Como parte de estas funciones, los llamados *Packet Schedulers* se encargan de asignar los recursos que dispone cada celda de la red a los usuarios que solicitan en un determinado momento transmitir o recibir información y

garantizar que se cumplan los requisitos mínimos de calidad de servicio para asegurar el buen funcionamiento de los servicios y con ello la satisfacción de los usuarios.

El presente Trabajo Especial de Grado propone la planificación y posterior optimización de una red LTE utilizando la herramienta de planificación radio ATOLL. Múltiples son las inquietudes que surgen como base para emprender este proyecto, planificar una red de cuarta generación que a los momentos solo es operativa en pocos países, permite vislumbrar los múltiples beneficios de los que se habla, por el momento, solo en los libros y las especificaciones. En este sentido, aprovechando la posibilidad de disponer de un *software* que permite modelar estas redes, se estudiarán diversos parámetros haciendo mayor hincapié en las funciones referentes a la gestión de recursos radio, específicamente a las estrategias de *Packet Scheduling* disponibles en el programa.

El informe se estructura como se describe a continuación. En el capítulo 1 se expone el contexto en el cual surge el proyecto así como los objetivos planteados, las limitaciones y alcances del mismo. En el capítulo 2 se explican los conceptos teóricos necesarios para la comprensión del proyecto introduciendo al lector con una breve descripción de la cuarta generación de comunicaciones móviles para después entrar en detalle en la tecnología LTE y las distintas estrategias de *Packet Scheduling* que intervienen en dicho sistema. En el capítulo 3 se describe la metodología empleada para la realización de cada fase del proyecto, desde la investigación teórica hasta la obtención de los resultados. En el capítulo 4 se explica en detalle los algoritmos y ecuaciones empleadas en ATOLL que son de interés en este trabajo, así como el proceso que se llevó a cabo para la planificación y optimización de la red LTE. El capítulo 5 contiene la descripción, resultados y análisis de todas las simulaciones realizadas en la red LTE sobre la herramienta ATOLL. Por último, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y las líneas futuras de investigación a partir del trabajo desarrollado.

## **CAPÍTULO I**

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El siguiente capítulo describe la propuesta del siguiente Trabajo Especial de Grado, la justificación del mismo, los objetivos generales y específicos, y las limitaciones y alcances encontrados en el proceso de realización del mismo.

#### I.1 Planteamiento del Problema

En este trabajo de investigación se propone llevar a cabo la planificación de una red LTE con la herramienta ATOLL para posteriormente estudiar diversos parámetros relacionados a estas redes y compararlos con los esperados según la teoría.

Específicamente se propone realizar un análisis detallado de las distintas estrategias de *Packet Scheduling* que intervienen en el proceso de gestión de los recursos radio para observar el impacto de cada una de ellas en la obtención de los *throughputs* por usuario, por celdas y totales de la red, así como en la cantidad de usuarios que pueden satisfacer sus demandas de tráfico en cada caso. Por último, en base a los resultados, establecer conclusiones sobre los algoritmos empleados por ATOLL en el modelado de las redes LTE.

## I.2 Objetivos

## I.2.1 Objetivo General

Planificar y optimizar una red LTE en la herramienta ATOLL para observar el impacto de las distintas estrategias de *Packet Scheduling* en el rendimiento de la red.

## I.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar las características del sistema de telefonía móvil LTE y conocer las distintas estrategias de *Packet Scheduling* que intervienen en el proceso de gestión de recursos radio.
- Estudiar los aspectos necesarios que intervienen en el proceso de planificación y optimización de una red LTE en la herramienta ATOLL.
- Aprender a utilizar la herramienta ATOLL y dominar cada uno de los parámetros que intervienen en el modelado de la red.
- Planificar y optimizar una red LTE en la ciudad de Barcelona, España, para posteriormente evaluar el funcionamiento de cada una de las estrategias de Packet Scheduling en el rendimiento de la red.
- Comparar los *throughputs* obtenidos en los enlaces ascendente y descendente con cada una de las estrategias de *Packet Scheduling* bajo distintas condiciones de la red.
- Comparar el rendimiento de la red al usar distintas técnicas de diversidad disponibles en ATOLL y observar si afectan a la red de igual medida según las estrategias de *Packet Scheduling* empleadas.

## I.3 Justificación

La iniciativa de este proyecto surge dentro del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GRCM) perteneciente al Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña con el fin de indagar en el nuevo módulo LTE desarrollado por la empresa FORSK disponible en el software ATOLL.

Previamente el grupo de investigación ha desarrollado proyectos basados en tecnologías de comunicaciones móviles 2G y 3G con la misma herramienta y se ha podido comprobar que los resultados obtenidos modelan de forma realista las redes en cuestión. Ahora, con la aparición de las tecnologías 4G de comunicaciones

móviles y la disponibilidad del nuevo módulo en ATOLL, surge la necesidad de planificar una red LTE para evaluar los resultados prácticos de diversos aspectos y establecer comparaciones con la teoría y las especificaciones del 3GPP establecidos para esta tecnología, con el fin de mantenerse siempre a la vanguardia de las nuevas tecnologías y evaluar en este caso la herramienta ATOLL en el modelado de las redes LTE.

## I.4 Limitaciones y alcances

#### I.4.1 Limitaciones

- Para desarrollar el proyecto fue necesario la versión 3.1.0 de ATOLL con el módulo AFP (Automatic Frequency Planning) instalado que permitieron realizar las asignaciones frecuenciales y de Physical Cell IDs de manera automática, precisa y rápida gracias a los algoritmos empleados por el software.
- Los estudios realizados se limitaron a las opciones que ATOLL dispone para modelar las redes LTE, en algunos casos los algoritmos empleados por ATOLL no corresponden a los empleados en la realidad porque se ven limitados por aspectos que no pueden implementarse en el programa. Por ejemplo, las simulaciones ocurren en un tiempo instantáneo y no tienen memoria del pasado.

#### I.4.2 Alcances

El trabajo se centra en el estudio de las estrategias de *Packet Scheduling* y no contempla el efecto de otros parámetros de las redes LTE que también pueden ser modelados en ATOLL como es el caso de las estrategias de coordinación de interferencia intercelular (ICIC) o de control de potencia fraccional (*Fractional Power Control*).



## **CAPÍTULO II**

## MARCO REFERENCIAL

El siguiente capítulo contiene una descripción general de los sistemas de comunicaciones móviles de cuarta generación de telefonía móvil. Posteriormente se describe la arquitectura del sistema LTE así como sus características más relevantes. Por último se exponen las distintas estrategias de *Packet Scheduling* utilizadas en LTE.

## II.1 Sistemas móviles de cuarta generación (4G)

La telefonía móvil es hoy en día la tecnología más utilizada en el planeta por encima del Internet, ordenadores personales, telefonía fija y otras tecnologías; estimándose que alrededor del 87% de la población mundial es usuario de telefonía móvil [1]. El rápido avance tecnológico ha permitido crear dispositivos móviles cada vez más sofisticados y capaces de proporcionar una amplia gama de aplicaciones, con lo cual la aceptación y penetración de la telefonía móvil a nivel mundial es más que evidente, convirtiéndose el teléfono celular en un dispositivo indispensable en la vida cotidiana del mundo actual.

El continuo crecimiento en la demanda de servicios de paquetes de datos y la posibilidad de elaborar terminales cada vez más avanzados aptos para ofrecer nuevas aplicaciones con mayores capacidades para imágenes, audio, video, *e-mail* y otras aplicaciones multimedia llevó a la necesidad de crear una nueva generación de comunicaciones móviles, la cuarta generación [2]. En este sentido, la ITU-R estableció los requisitos para las redes de cuarta generación bajo el nombre de IMT-Advanced. Algunos de los requisitos consisten en una red basada completamente en conmutación por paquete con una arquitectura plana basada en el protocolo IP (*Internet Protocol*), velocidades de transferencia de datos mayores a 100 Mbps para altas movilidades y de 1 Gbps para entornos relativamente fijos, interoperabilidad con

estándares existentes, canalizaciones flexibles, menores tiempos de latencia, entre otros [3].

Tal y como se observa en la Figura 2.1, existen tres organizaciones que se han encargado de desarrollar estándares de comunicaciones móviles con el fin de cumplir los requisitos del IMT-Advanced. La 3GPP (*Third Generation Paterntship Project*) empezó a finales de 2004 la primera especificación del sistema LTE (*Long Term Evolution*) que fue concluida a finales de 2008 y ha evolucionado posteriormente a LTE-Advanced. Por otro lado, la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ha creado la familia 802.16 conocida como WiMAX donde la versión 802.16m, también conocida como WirelessMAN-Advanced, ha sido aprobada por la ITU-R como una tecnología IMT-Advanced. Por último, la 3GPP2 comenzó el desarrollo del sistema UMB (*Ultra Mobile Broadband*) como evolución del sistema CDMA2000 con las intenciones de convertirse en un sistema de 4G pero el proyecto fue dejado inconcluso para pasar a apoyar a LTE [3].

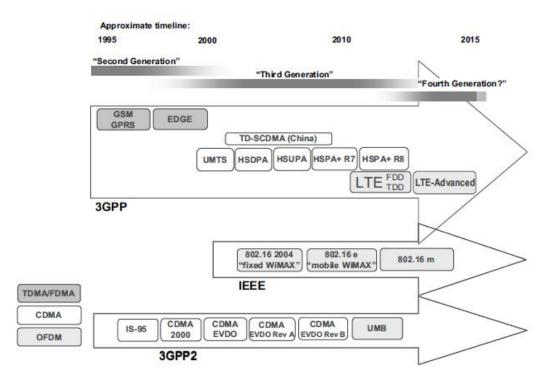


Figura 2.1: Estándares de comunicaciones móviles.

Fuente: extraído de [3].

Cabe mencionar una aclaración expuesta en el documento [4] acerca de las tecnologías consideradas IMT-Advanced:

Tras una detallada evaluación acerca de estrictos criterios técnicos y operativos, la ITU ha determinado que "LTE-Advanced" y "WirelessMAN-Advanced" deben recibir la designación oficial de IMT-Advanced. Siendo las tecnologías más avanzadas actualmente en comunicaciones de banda ancha móvil, IMT-Advanced es considerada como "4G", aunque se reconoce que este término, mientras no estuvo definido, también puede ser aplicado a los precursores de estas tecnologías, LTE y WiMAX, y a otras tecnologías que evolucionaron de sistemas 3G proporcionando un importante nivel de mejora en el rendimiento y en las capacidades con respecto a los sistemas iniciales de 3G desplegados. Las especificaciones detalladas de las tecnologías IMT-Advanced serán proporcionadas en una nueva Recomendación ITU-R que se espera a comienzos de 2012.

A continuación se abarcará con mayor detalle el sistema LTE de cuarta generación, sistema sobre el cual se basa el presente Trabajo Especial de Grado.

## II.2 Sistema LTE

El sistema LTE fue diseñado por la 3GPP con la idea de incrementar en gran medida las capacidades que ofrecían los sistemas de comunicaciones móviles anteriores. En este sentido, LTE es el primer sistema en ofrecer todos los servicios, incluida la voz, sobre el protocolo IP dejando atrás la conmutación de circuitos para pasar a un nuevo sistema basado completamente en conmutación de paquetes. Además, las velocidades pico de la interfaz radio que introduce LTE superan ampliamente a aquellas conseguidas en los sistemas anteriores, soportando velocidades de al menos 100 Mbps en el *downlink* y 50 Mbps en el *uplink*, que permite a los usuarios la posibilidad de movilizarse a grandes velocidades y al mismo tiempo disfrutar de los servicios multimedia [5].

#### II.2.1 Acceso múltiple multiportadora

El sistema LTE se caracteriza por ofrecer una canalización flexible que permite alcanzar altas velocidades de transmisión y facilitar la migración gradual hacia LTE de bandas espectrales ocupadas por 2G y 3G. En este sentido, las posibles canalizaciones son: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz y 20 MHz, siendo esta última la considerada para alcanzar velocidades de transmisión en el orden de 100 Mbps en el *donwlink*. Además de la canalización flexible, LTE permite trabajar en bandas pareadas con FDD y no pareadas con TDD [5].

En vista de que el ancho de banda de 20 MHz introduciría elevadas distorsiones debido a la interferencia intersimbólica (ISI) ocasionada por la propagación multicamino, se adoptó la técnica de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el *donwlink* que permite dividir el espectro en múltiples portadoras de banda estrecha ortogonales entre sí con una separación fija de 15 KHz. Para obtener los distintos anchos de banda mencionados se varía el número de subportadoras, manteniendo la separación entre ellas constante. Incluso utilizando OFDMA queda presente cierta interferencia, por lo tanto se emplea un prefijo cíclico que permite eliminar la ISI ofreciendo de esta manera una gran eficiencia espectral [2].

Gracias al *scheduler* empleado en OFDMA se pueden asignar las portadoras eficientemente a los usuarios dependiendo de las condiciones del canal y los requisitos de los servicios de cada uno de ellos, concediendo más o menos portadoras a cada usuario según el caso y ofreciendo diversidad frecuencial al asignar portadoras no contiguas a un mismo usuario. Por otro lado, la implementación de esta técnica se hace sencilla en el dominio digital gracias a la implementación de los procesos de FFT (*Fast Fourier Transform*) y IFFT (*Inverse FFT*) [5].

En el *uplink* se adoptó una variante de OFDMA llamada SC-FDMA (*Single Carrier- Frequency Division Multiple Access*) que presenta una significante reducción de la relación entre la potencia instantánea transmitida y la potencia media,

denominado PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*), evitando complejidades en el amplificador de frecuencia de los terminales móviles y aumentando la batería de los mismos.

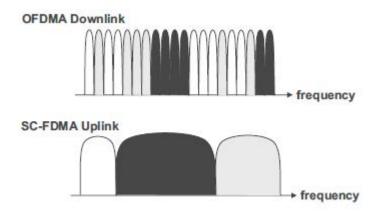
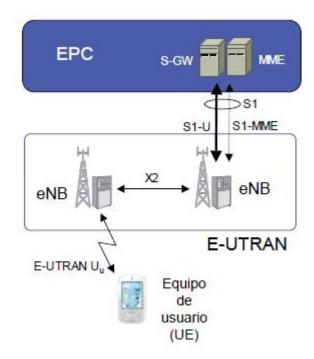


Figura 2.2: Dominio frecuencial de las tecnologías de acceso múltiple de LTE.

Fuente: extraído de [3].

## II.2.2 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema LTE se diseñó en base a tres requisitos fundamentales: conmutación de paquetes únicamente, baja latencia y costos reducidos. Para lograr los objetivos, se planteó una arquitectura plana sin ningún nivel de jerarquización con la menor cantidad de nodos e interfaces posibles. La arquitectura de LTE comprende una nueva red de acceso denominada E-UTRAN (Evolved- UMTS Terrestrial Radio Access Network) y una nueva red troncal denominada EPC (Evolved Packet Core), la combinación de la red de acceso y la red troncal recibe el nombre de EPS (Evolved Packet System), también llamada bajo el término LTE [5].



**Figura 2.3:** Arquitectura de red LTE.

Fuente: extraído de [5].

#### II.2.2.1 Red de acceso E-UTRAN

La red de acceso de LTE está formada por un único elemento de red llamado eNB (*evolved NodeB*) que constituye la estación base de E-UTRAN. Los eNBs realizan todas las funciones de la red de acceso que en las redes 3GPP anteriores eran llevadas a cabo por las estaciones base junto a los controladores de red (BTS y BSC en GSM, NodeB y RNC en UMTS), de allí que sea denominada una arquitectura plana. En este sentido, las funciones que realizan los eNBs incluyen la gestión de recursos radio (control de los *Radio Bearers*, control de admisión radio, control de la movilidad, *scheduling* de paquetes y asignación dinámica de los recursos tanto en *uplink* como en *downlink*), compresión de cabeceras, seguridad en la interfaz radio y conectividad con la red troncal EPC [3].

Para llevar a cabo todas las funciones mencionadas, los eNBs están interconectados a los equipos de usuario (UE) mediante la interfaz Uu donde aplican los protocolos AS (*Access Stratum*). Asimismo, la interfaz que conecta a los eNBs

entre sí es denominada X2, y la interfaz que conecta un eNB a la red troncal EPC es denominada S1, que a su vez se divide en S1-MME para el plano de control y S1-U para el plano de usuario [5].

#### II.2.2.2 Red troncal EPC

La red troncal de LTE es la responsable de proporcionar un servicio de conectividad IP para permitir el acceso a las distintas redes externas y plataformas de servicios como IMS (*IP Multimedia Subsystem*) y a la vez controlar el establecimiento de los *Bearers*. Los elementos principales del EPC son: el MME (*Mobility Management Entity*), el S-GW (*Serving Gateway*) y el P-GW (*Packet Data Network Gateway*), pero además de estas entidades se encuentran también el HSS (*Home Subscriber Server*) y el PCRF (*Policy Control and Charging Rules Function*) [3].

El MME se encarga de las funciones y señalización del plano de control entre el UE y la red troncal donde se soportan los protocolos NAS (*Non Access Stratum*). Las funciones principales del MME son el establecimiento, mantenimiento y liberación de los *Bearers* así como el establecimiento de la conexión y la seguridad entre la red y el UE. Por otro lado, las funciones asociadas al plano de usuario se concentran en el S-GW y el P-GW, quienes además se encargan de servir de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y redes 3GPP y no 3GPP respectivamente. El HLR es la base de datos principal que contiene la información de los subscriptores tales como los perfiles de QoS (*Quality of Service*), las restricciones de *roaming*, información permanente y dinámica del usuario, etc. Por su lado, el PCRF se encarga de controlar los servicios portadores que ofrece la red LTE y de los mecanismos de tarificación [5].

Una vez obtenida una idea general del sistema LTE se describirán a continuación las distintas estrategias de *Packet Scheduling* desarrolladas en el sistema LTE.

## **II.3 Packet Scheduling**

Con la introducción de la transmisión en modo paquete surgió la necesidad de crear nuevos mecanismos que permitieran conseguir un uso eficiente de los recursos radio disponibles entre los diferentes usuarios. Estos mecanismos se conocen como gestión de recursos radio o RRM (*Radio Resource Management*) y constituyen una parte esencial en el funcionamiento del sistema LTE así como de sus antecesores UMTS y HSPA. El objetivo de RRM es optimizar la asignación de los recursos radio logrando que la mayor cantidad de usuarios tenga acceso a la red y al mismo tiempo garantizar los niveles de calidad de servicio necesarios asociados a cada uno de los servicios establecidos en el segmento radio [2].

Una de las principales funciones de RRM es el *Packet Scheduling* o *scheduler* de paquetes, encargado de asignar los recursos a los usuarios dentro del área de cobertura de la celda decidiendo qué usuarios transmiten en cada momento y bajo qué esquemas de modulación y codificación. En otras palabras, el *scheduler* permite asignar los recursos dinámicamente a los usuarios para que éstos puedan realizar sus transmisiones de forma ordenada [5].

Por otro lado, el uso de un *scheduler* apropiado en conjunto con la técnica ICIC (*Inter-Cell Interference Coordination*) permite que el sistema LTE trabaje con un factor de reuso frecuencial igual a 1, es decir que todos los recursos radio están disponibles en todas las celdas. Para esto, el *scheduler* debe ser capaz de evitar las interferencias de células adyacentes a usuarios que se ubican en el borde de la celda, asignándoles recursos que no estén siendo utilizados por las celdas vecinas. Esta coordinación entre *schedulers* se logra gracias a la interfaz X2 entre eNBs [5].

## II.3.1 Downlink y Uplink Packet Scheduling

En el caso de LTE, las funciones del *Packet Scheduling* son llevadas a cabo por los eNBs para la asignación de los recursos radio tanto en el *donwlink* como en el *uplink*. En ambos casos, el *scheduler* toma las decisiones acerca de la asignación de

los recursos tomando en cuenta el estado de los *buffers* (para asignar recursos solo a los usuarios que tienen información por enviar o recibir), las prioridades y requisitos de QoS de los servicios asociados a los usuarios (en tanto que aquellos que requieran enviar más información necesitan un mayor número de portadoras) y la información del estado del canal que observa cada usuario en las diferentes subportadoras (tomando en cuenta la SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) para no asignarle a un usuario aquellas portadoras donde presenta elevada atenuación o interferencia) [5].

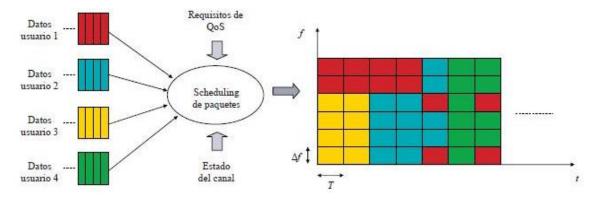


Figura 2.4: Scheduling de paquetes en OFDMA (downlink).

Fuente: extraído de [5].

En LTE, a diferencia de los sistemas de comunicaciones antecesores, no existen canales de tráfico dedicados sino compartidos. En otras palabras, los recursos son asignados a los usuarios únicamente cuando tienen datos para enviar o recibir. De esta manera el *scheduler* asigna el canal PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*), que transporta los datos de usuario en el enlace descendente, cuando los usuarios tienen información para recibir, o el canal PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*), que transporta los datos de usuario en el enlace ascendente, cuando los usuarios tienen información para enviar. En ambos casos la asignación se le comunica al usuario mediante el canal de control PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) para que puedan modular/demodular los canales de tráfico respectivos en el dominio tiempo-frecuencia que le fueron asignados. Cabe destacar que en el caso del enlace ascendente el móvil debe enviar su petición previamente al

eNB para que el *scheduler* pueda asignarle los recursos, esto se lleva a cabo mediante el canal de control PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) a través de los *Scheduling Request* [5].

El *Packet Scheduling* está implementado en la capa RLC/MAC pues opera a corto plazo, es decir que permite reaccionar a las rápidas variaciones del canal radio y asignar recursos cada TTI (*Transmission Time Interval*), que corresponde a la duración de una subtrama siendo igual a 1 ms. El mínimo recurso radio asignable a un usuario corresponde a un SRB (*Scheduler Resource Block*) que consiste en dos PRB (*Physical Resource Block*) consecutivos. Asimismo, cada PRB consiste en un bloque de 180 kHz conformado por 12 subportadoras adyacentes espaciadas a 15 kHz entre sí, con una duración igual a 0.5 ms, que es la duración de un *time slot*. En un PRB se pueden transmitir 6 ó 7 símbolos OFDMA (dependiendo de la longitud del prefijo cíclico empleado) con modulación QPSK, 16QAM o 64QAM [5].

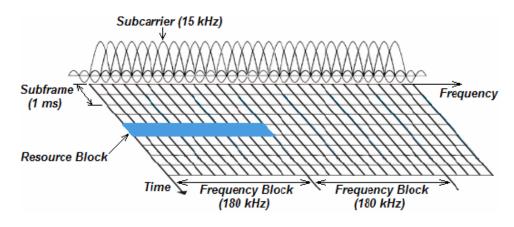
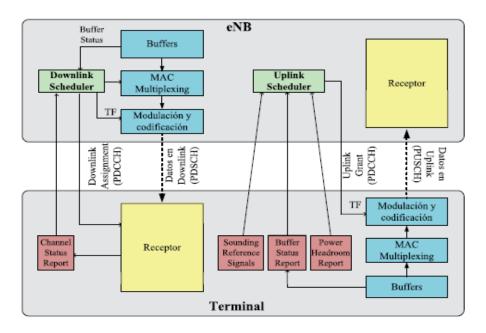


Figura 2.5: Physical Resource Blocks de LTE.

Fuente: extraído de [6].

Los procedimientos de *Packet Scheduling* en el *uplink* para SC-FDMA son similares a los empleados en el *downlink* para OFDMA, sin embargo, debido a que estas funciones residen en el eNB, la asignación de los recursos en el enlace ascendente es más compleja que en el enlace descendente ya que requiere de mayor señalización del sistema. Por ejemplo, el UE debe transmitir al eNB unas señales

denominadas SRS (Sounding Reference Signals) para estimar la calidad del canal en cualquier PRB, además debe reportar el estado de su buffer enviando los BSR (Buffer Status Report) y debe informar su disponibilidad de potencia por medio de los mensajes power headroom para que el scheduler pueda establecer el esquema de modulación y codificación. Además, a diferencia del downlink, en el uplink las subportadoras asignadas a un usuario deben ser contiguas por basarse en SC-FDMA [3].



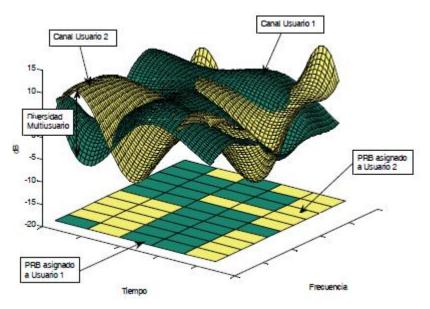
**Figura 2.6:** Esquema funcional para scheduling en LTE.

Fuente: extraído de [5].

#### II.3.2 Dominio temporal y frecuencial del Packet Scheduling

Para mejorar la capacidad del sistema, LTE establece soporte de *Packet Scheduling* en el dominio temporal y frecuencial. En el dominio temporal el *scheduler* permite explotar la diversidad multiusuario considerando que en una determinada subtrama ciertos usuarios observarán un canal de mayor calidad que otros usuarios, y en este sentido el *scheduler* les asignará recursos a los usuarios del primer grupo. Cabe destacar que la ganancia que ofrece la diversidad multiusuario será mayor en la medida que la red tenga más usuarios y que las variaciones del canal

sean más rápidas. Por otro lado, el concepto de diversidad multiusuario se extiende al dominio frecuencial ya que el *scheduler* explota los desvanecimientos lentos en frecuencia en tanto que se evita asignar un PRB a un usuario que presente grandes desvanecimientos en las frecuencias de dicho PRB, y de esta manera se pueden asignar recursos a múltiples usuarios en las subportadoras donde cada uno obtenga una mejor calidad de canal [5].



**Figura 2.7:** Efecto de la diversidad multiusuario en el Packet Scheduling.

Fuente: extraído de [5].

#### II.3.3 Scheduling semi-persistente

Además del *scheduling* dinámico descrito anteriormente, LTE introduce el *scheduler* semi-persistente en el cual los recursos radio son asignados a los usuarios para un conjunto sucesivo de varias subtramas en vez de cada TTI. El uso de un *scheduler* semi-persistente es útil cuando se trata de un servicio con pequeños volúmenes de tráfico que llegan de forma regular, como es el caso de VoIP (*Voice over IP*), pues reduce significativamente la cantidad de mensajes de señalización y permite ofrecer un servicio de voz con calidad comparable a los sistemas basados en modo circuito [7].

### II.3.4 Estrategias de Packet Scheduling

El estándar indica que se debe implementar el *Packet Scheduling* como una de las funcionalidades de RRM, sin embargo no especifica el algoritmo que se debe utilizar, por lo tanto cada fabricante es responsable de implementar la estrategia que mejor considere. En este sentido, se han definido diversas técnicas de *Packet Scheduling*, algunas de las cuales toman en consideración las condiciones del canal (*channel-aware scheduling*), otras que intentan realizar una asignación justa entre usuarios y otras cuyo objetivo es maximizar la capacidad de la red.

A continuación se describen las cuatro estragias de *Packet Scheduling* que pueden configurarse dentro de la herramienta ATOLL para la planificación de una red de telefonía celular LTE.

#### II.3.4.1 Round Robin (RR)

Esta estrategia asigna los recursos a los usuarios de manera cíclica por la misma cantidad de tiempo sin tomar en cuenta las condiciones del canal. Se considera una estrategia justa en el sentido que todos los usuarios tienen la misma cantidad de recursos asignados, pero a la vez es injusta en el sentido que aquellos usuarios con condiciones más favorables obtienen un *throughput* mayor a los que presentan peores condiciones de canal, que para igualar a los primeros requerirían un mayor número de recursos [5].

Se considera que RR es una estrategia simple y fácil de implementar pero a la vez no es muy eficiente, porque al no tomar en cuenta las condiciones del canal no se garantiza que exista buena calidad en el enlace entre la estación base y el usuario al que se le ha asignado un recurso, lo que se refleja en una reducida capacidad de la celda, y en consecuencia de la red en general, en comparación a otras estrategias [8].

#### II.3.4.2 Proportional Fair (PF)

Esta estrategia sí toma en cuenta las condiciones del canal (es *channel-aware*) y su objetivo es conseguir un equilibrio entre ser una estrategia justa y optimizar el *throughput* de cada usuario, para ello el *scheduler* asigna recursos a un usuario cuando la calidad de canal que dicho usuario observa en un determinado momento (calidad instantánea) es mayor a la calidad media que el mismo usuario ha percibido en el tiempo [3].

En este sentido, el SRB l es asignado al usuario k con la mayor prioridad, donde la prioridad viene definida por:

$$P_k = \frac{r_l^{(k)}}{T_k(t)} \tag{2.1}$$

Donde  $T_k(t)$  representa el throughput medio que el usuario k ha obtenido en una ventana de tiempo en el pasado y  $r_l^{(k)}$  representa la tasa instantánea que el usuario k puede obtener en el SRB l. Una vez que la asignación del SRB se ha llevado a cabo se actualiza el valor del throughput medio  $T_k(t)$  [8].

La estrategia PF está diseñada para sacar provecho a la diversidad multisuario y al mismo tiempo mantener niveles comparables entre los *throughputs* de los distintos usuarios. Como el *scheduler* selecciona al usuario con la mejor calidad instantánea sobre calidad media, para cada usuario se evitan los canales donde observan malas condiciones. Además, los usuarios que han pasado un tiempo a la espera de recursos obtienen mayor prioridad logrando de esta manera una repartición justa [7].

#### II.3.4.3 Proportional Demand (PD)

Esta estrategia asigna los recursos de manera proporcional a las demandas máximas de *throughput*, con lo cual los usuarios que solicitan niveles mayores de

throughput máximo obtendrán mayores throughput que aquellos que solicitan menores niveles de throughput máximo [9].

#### II.3.4.4 Maximun C/I (Max C/I)

En esta estrategia el *scheduler* asigna los recursos cada TTI a los usuarios que presenten las mejores condiciones SINR. Con esta estrategia se consigue maximizar la capacidad de la celda pero es una estrategia injusta ya que los recursos solo estarán disponibles para los usuarios con las mejores condiciones del canal, y aquellos que se encuentran en los bordes de las celdas (donde se presencian mayores interferencias y atenuaciones) se verán penalizados al punto que no podrán cumplir con los requisitos de QoS [2].



# **CAPÍTULO III**

# **METODOLOGÍA**

En este capítulo se enuncian las distintas fases que comprende este proyecto con una visión general, sin entrar en detalle sobre su realización.

## III.1 Investigación teórica

En una primera fase se realizó una investigación teórica acerca de los sistemas de cuarta generación de comunicaciones móviles para luego profundizar en el sistema LTE, entender el funcionamiento del mismo y las diferencias con los sistemas antecesores. Una vez estudiado el sistema LTE, se realizó una investigación más detallada de las estrategias de *Packet Scheduling* que intervienen como parte del mecanismo de gestión de recursos radio de dicho sistema.

## III.2 Aprendizaje de la herramienta ATOLL

La segunda fase consistió en aprender a manejar la herramienta ATOLL versión 3.1.0, para ello fue necesario realizar una lectura del manual "User Manual Radio" con el fin de repasar los términos relacionados a las redes LTE y familiarizarse con cada parámetro del programa. Posteriormente se estudiaron en detalle los algoritmos empleados por ATOLL para realizar las simulaciones y predicciones de interés en este proyecto, así como las fórmulas implicadas en dichos cálculos. Para ello fue necesario el manual "Technical Reference Guide" que contiene las descripciones detalladas de los modelos, algoritmos y conceptos adoptados en ATOLL.

A continuación se tomaron datos de prácticas desarrolladas por el Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña para realizar diversas pruebas con mapas de las ciudades de Barcelona y Sevilla. En este sentido, se

realizaron simulaciones y predicciones con el objetivo de apreciar de forma general el impacto en los resultados obtenidos al modificar distintos parámetros de la red tales como los valores de umbrales de selección y las eficiencias espectrales de los *Radio Bearers*, pérdidas de propagación, configuración de la técnica ICIC, modificación de la canalización, estrategias de *Packet Scheduling*, combinación de estrategias de gestión de recursos radio, empleo del *Fractional Power Control*, entre otros.

### III.3 Planificación y optimización de la red LTE en ATOLL

Una vez conocido el modo de funcionamiento de ATOLL se procedió en la tercera fase a desarrollar la planificación de la red LTE en la ciudad de Barcelona sobre la cual se analizarían las distintas estrategias de *Packet Scheduling*.

Posteriormente se llevó a cabo la optimización de la red y se realizaron diversas simulaciones y predicciones para cada una de las estrategias bajo distintas condiciones de la red, por ejemplo, se estudiaron los resultados de predicciones de cobertura con condiciones de carga establecidas tanto manualmente como obtenidas por simulaciones, se comparó la capacidad de la red LTE antes y después del proceso de optimización, se estudiaron los distintos parámetros de los *schedulers* y se modificaron ciertos valores para ajustar los resultados a la realidad, y por último se emplearon distintas técnicas de diversidad para observar el impacto de éstas en la red.

# III.4 Procesado de los datos y análisis

La última fase consistió en el procesado y análisis de los datos. En algunas ocasiones fue necesario tomar los datos de las simulaciones realizadas en ATOLL para realizar gráficas en Excel y facilitar la interpretación de los resultados obtenidos con el fin de establecer comparaciones más precisas entre las distintas estrategias de *Packet Scheduling*. Por último, se analizaron los resultados y se establecieron conclusiones en base a los mismos.

# **CAPÍTULO IV**

## **DESARROLLO**

Este capítulo explica en detalle los procedimientos mencionados en el capítulo de metodología y se relaciona posteriormente con el capítulo V que contiene la descripción y los resultados de las distintas simulaciones realizadas.

## IV.1 Aprendizaje de la herramienta ATOLL

ATOLL es un *software* para planificación y optimización radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificación de sus redes y estudiar el comportamiento de las mismas para optimizarlas de la mejor manera posible. A partir del año 2008 ATOLL cuenta con un módulo LTE, el primero en el mercado, que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN. Con la versión 3.1.0 ATOLL ofrece además la posibilidad de crear redes avanzadas de múltiples tecnologías (p. ej. GSM/UMTS/LTE, CDMA2000/LTE) ideal para aquellos operadores que necesitan migrar sus redes hacia LTE.

A continuación se explicarán algoritmos, términos y definiciones de ATOLL necesarios para la comprensión del proyecto.

#### IV.1.1 Diseño de una red LTE en ATOLL

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al diseño de una red LTE con la herramienta ATOLL. El primer paso para cualquier proyecto de planificación radio es recopilar la información necesaria en cuanto a los equipos radio (p. ej. emplazamientos, transmisores, antenas, etc.), información de la tecnología radio (bandas de frecuencias y otros parámetros específicos de la tecnología a implementar) e información geográfica (p. ej. *clutter classes, clutter heights*, mapas de tráfico, etc.) que se utilizará en el despliegue.

Posteriormente se debe abrir o crear un nuevo proyecto, para esto ATOLL tiene definido unas plantillas (*Templates*) con parámetros específicos a cada tecnología, en este caso el *Template LTE* es seleccionado para modelar la red según las especificaciones de la 3GPP.

El tercer paso consiste en la configuración de la red agregando los mapas del terreno, emplazamientos (*Sites*), transmisores (*Transmitters*), celdas (*Cells*) y todos aquellos parámetros de la red que fueron recopilados en el primer paso.

ATOLL ofrece la posibilidad de realizar predicciones básicas de cobertura por nivel de señal recibida sin tomar en cuenta las interferencias. Estas predicciones comprenden estudios del nivel de señal recibido de distintas señales LTE en cada píxel del mapa, coberturas por transmisor y estudios de *overlapping* que permiten estudiar la configuración inicial de la red sin tomar en cuenta datos de tráfico.

Como quinto paso se propone calcular y establecer los vecinos de cada celda para después realizar una asignación de las frecuencias en base a las colindancias establecidas evitando en la mayor medida las interferencias. Posteriormente se puede realizar una asignación de los *Physical Cell IDs* para facilitar el procedimiento de selección de celdas. ATOLL permite que estos tres pasos puedan llevarse a cabo de forma manual o automática.

Para realizar predicciones de cobertura avanzadas es necesaria la información de cargas de tráfico de las celdas que conforman la red, porque a medida que la carga de una celda se incrementa, se reduce el área de cobertura que ésta ofrece. Para ello pueden realizarse simulaciones Monte Carlo, basadas en los mapas de tráfico o en las listas de subscriptores, o se pueden definir los valores manualmente para cada celda. Las predicciones en este punto se calculan en base a la calidad de la señal recibida tomando en cuenta las interferencias y comprenden el estudio de nivel portadora a interferencia, área de servicio de las celdas, cobertura por *throughput* o indicadores de calidad.

Por último se analizan los resultados de las simulaciones y las predicciones de cobertura por calidad de señal para realizar modificaciones, si es necesario, en los parámetros configurados al inicio o realizar cambios en la planificación frecuencial. Si se realizan modificaciones deben realizarse nuevamente los pasos 8 y 9.

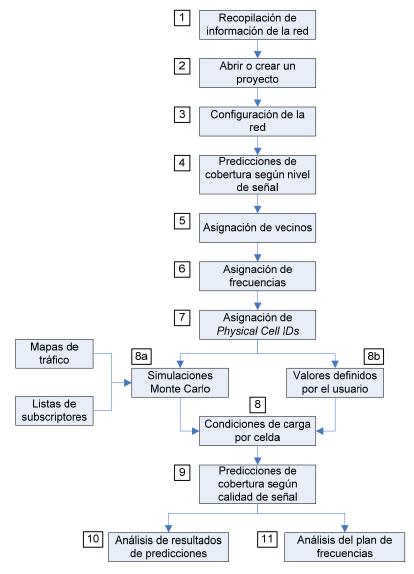


Figura 4.1: Diagrama de flujo del diseño de una red LTE en ATOLL.

Fuente: extraído de [6].

#### IV.1.2 Predicciones de Cobertura

Existen dos tipos de predicciones de cobertura en ATOLL, las que permiten analizar los niveles de señal y las que permiten analizar la calidad de la señal. Las primeras no dependen de las condiciones de carga de la red ni de las interferencias, mientras que las segundas sí.

En las predicciones cada píxel del mapa es considerado como un usuario no interferente con un servicio, movilidad y terminal específico que se definen al momento de realizar la predicción. En cuanto al servicio, se toman en cuenta los valores de *Bearer* máximo y mínimo que puede emplear el servicio en cuestión, así como el *Throughput Scaling Factor, Throughput Offset* y las pérdidas por cuerpo. La movilidad determina los umbrales de selección de *Bearers* y las curvas de calidad de los equipos de recepción empleadas en los cálculos, ya que los requisitos de C/(I+N) para la selección de diferentes *Radio Bearers* depende en gran medida de la velocidad del móvil. Por último, el tipo de terminal influye en tanto que la figura de ruido establecida afectará los cálculos del ruido total en el *downlink*, así como el número de antenas afectará los casos que empleen diversidad.

Las predicciones de calidad de señal se basan en los valores de *DL Traffic Load* y *UL Noise Rise* establecidos en la tabla de celdas (*Cells Table*) o calculados por simulaciones Monte Carlo para calcular la relación portadora a interferencia más ruido, C/(I+N), en cada píxel del mapa. Es importante resaltar que a pesar de que ATOLL permite establecer un valor de *UL Traffic Load*, éste solo es un indicador de las cargas de las celdas en el *uplink* pero únicamente el *UL Noise Rise* es tomado en consideración en las predicciones.

La Tabla 4.1 muestra las distintas predicciones que pueden realizarse en ATOLL y una breve descripción de cada una.

Clasificación	Nombre	Descripción
	Coverage by Signal Level	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa.
Por nivel de	Coverage by Transmitter	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor.
señal	Overlapping Zones	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.
	Effective Signal Analysis	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH).
	Coverage by C/(I+N) Level	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido C/(I+N) para cada píxel del mapa.
	Service Area Analysis	Permite calcular y mostrar los mejores <i>Radio Bearers</i> disponibles para cada píxel del mapa basados en las C/(I+N) de los mismos.
Por calidad de	Effective Service Area Analysis	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible tanto en el DL como en el UL.
señal	Coverage by Throughput	Permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa los <i>Channel Throughputs</i> y <i>Cell Capacities</i> basados en los niveles de C/(I+N) y en los <i>Radio Bearers</i> disponibles. Además permite mostrar el <i>Aggregate Cell Throughput</i> para resultados de simulaciones.
	Coverage by Quality Indicator	Permite calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, BER, etc.) basados en los <i>Radio Beareres</i> y en los niveles de C/(I+N) de cada píxel.

Tabla 4.1: Predicciones de cobertura disponibles en ATOLL.

#### **IV.1.3 Simulaciones Monte Carlo**

Las simulaciones de ATOLL corresponden a una foto instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Los principales *outputs* de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas.

Los resultados de dichas simulaciones pueden ser observados en el mapa así como en tablas que muestran las estadísticas de las simulaciones y los datos relacionados a los *Sites*, *Cells* y *Mobiles*.

El algoritmo que emplea ATOLL para las simulaciones de las redes LTE se muestra en la Figura 4.2. El proceso consta de los siguientes pasos:

#### 1. Generación y distribución de los usuarios

ATOLL genera una distribución de usuarios para cada simulación mediante el algoritmo Monte Carlo. Los usuarios son generados usando una distribución de Poisson basándose en los mapas de tráfico que contienen la información del tipo de entorno (*Environment*) para cada píxel del mapa. Cada uno de los *Environments* tiene a su vez la información de los perfiles de usuario con sus movilidades y densidades asociadas.

En este sentido, cada móvil generado tiene asignado un servicio, una movilidad y un tipo de terminal de acuerdo al perfil de usuario que se le ha asignado previamente. También se determina para cada móvil el *status* de transmisión (p. ej. inactivo, activo en el DL, activo en el UL o activo en DL y UL) de acuerdo a las probabilidades de actividad para cada servicio. Cabe destacar que el *status* del móvil influye directamente en los siguientes pasos del proceso de las simulaciones tanto en los cálculos de RRM como en los cálculos de interferencia.

Posteriormente se calculan los valores de EPRE (*Energy per Resource Element*) de los canales a partir de la potencia máxima de los transmisores, se inicializan los valores de potencia de transmisión de los terminales a la máxima definida y los valores de carga de las celdas se inicializan según estén establecidos en el *Cells Table*.

### 2. Determinación de la mejor celda servidora

En este punto se determina la mejor celda servidora para cada móvil según los niveles de señal recibida en el *downlink* de las señales de referencia de los distintos transmisores, siendo seleccionada aquella con la mayor potencia de señal recibida.

#### 3. Determinación del área de servicio

Para cada móvil se determina si se encuentra dentro del área de servicio de la celda seleccionada como su mejor servidor. Para esto se debe cumplir que el EPRE de la señal de referencia recibido por el móvil sea mayor o igual al mínimo RSRP (*Received Reference Signal Energy per Resource Element*) definido para la celda.

#### 4. Cálculos en el downlink

Se calcula la C/(I+N) de las señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH y PDCCH para cada móvil en el *downlink*, se determina el mejor *Bearer* disponible según la C/(I+N) del canal PDSCH, se calcula el *Channel Throughput* en la ubicación del móvil, se realiza la asignación de los recursos a los usuarios de cada celda de acuerdo a las prioridades de los servicios y a las demandas de *throughput* y por último se calcula el *User Throughput* de cada usuario según los recursos que le fueron asignados.

#### 5. Cálculos en el *uplink*

De forma similar al *downlink*, en el *uplink* se calcula la C/(I+N) de los canales PUSCH y PUCCH, se determina el mejor *Bearer* disponible según la C/(I+N) de los canales PUSCH y PUCCH, se realiza el control de potencia en el *uplink*, se calcula el *Channel Throughput*, se lleva a cabo la asignación de los recursos y se calcula el *User Throughput* de cada usuario.

#### 6. Resultados

Una vez que se han asignado los recursos a todos los móviles se actualizan los valores de *Traffic Load* y *UL Noise Rise* de acuerdo a la cantidad total de recursos en uso en cada celda. De acuerdo a los valores de *UL Noise Rise* y *Max UL Noise Rise* de cada celda se realiza el control de potencia de transmisión de los móviles de las celdas vecinas para ser tomados en cuenta en las siguientes iteraciones.

Cuando los resultados superan las pruebas de convergencia, finaliza la simulación y se muestran los resultados. Los principales resultados que se obtienen son: Downlink Traffic Loads, Uplink Traffic Loads, Uplink Noise Rise, Downlink ICIC ratio, Uplink ICIC noise rise, Downlink AAS usage, Uplink MU-MIMO capacity gain, Maximum PUSCH C/(I+N), Number of connected users in downlink y Number of connected users in uplink.

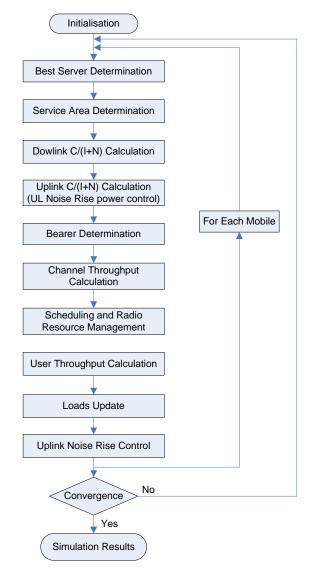


Figura 4.2: Algoritmo de las simulaciones LTE en ATOLL.

Fuente: extraído de [9].

### IV.1.4 Detalle de los cálculos referentes al scheduling y RRM

Previamente se ha explicado el algoritmo general que utiliza ATOLL para realizar las simulaciones, a continuación se explicarán en detalle los algoritmos y ecuaciones que intervienen en los cálculos de *scheduling* y RRM de ATOLL. Primero es necesario definir ciertos términos empleados en ATOLL:

- Peak RLC Channel/User Throughput: se refiere al máximo throughput de la capa RLC (de canal o usuario) que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible. Es la tasa de datos bruta sin considerar los efectos de retransmisión debido a errores, ni la codificación y encriptación de las capas superiores.
- Effective RLC Channel/User Throughput: es el throughput neto de la capa RLC (de canal o usuario) que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible tomando en consideración la reducción de throughput debido a la retransmisión por errores.
- Application Channel/User Throughput: es el throughput de la capa de aplicación (de canal o usuario) que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible tomando en consideración la reducción de throughput debido a la información de encabezados PDU/SDU, bits de relleno, encriptación y codificación.
- Channel Throughput: corresponde al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible con la cantidad total de recursos de la celda (downlink o uplink).
- Allocated Bandwitdth Throughputs: corresponde al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible con el número de subcanales calculado.
- User Throughputs: corresponde al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible con el número de recursos asignados a un usuario por el scheduler.

- *Traffic Loads*: corresponde a los porcentajes de tramas en uso de una celda asignadas para el tráfico de usuarios en el *downlink* y el *uplink*.
- *Uplink Noise Rise*: es una medida de la interferencia en el *uplink* respecto al ruido en el *uplink*. Define la interferencia máxima que puede tolerar una celda respecto a sus celdas vecinas.
- Cell Capacity: se refiere al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación tomando en consideración los límites de carga máxima de las celdas. Es decir, es igual al Peak RLC, Effective RLC o Application Channel Throughput cuando el Max traffic Load es 100%, y es igual a un Channel Throughput limitado por la cantidad de carga de tráfico cuando el Max Traffic Load es menor al 100%.

A continuación se definen los parámetros de los schedulers en ATOLL:

- Target Throughput for Voice Services: se refiere al throughput que el scheduler tendrá como objetivo al momento de asignar los recursos para los servicios de voz. Las opciones son: Peak RLC Throughput, Effective RLC Throughput y Application Throughput.
- Target Throughput for Data Services: se refiere al throughput que el scheduler tendrá como objetivo al momento de asignar los recursos para los servicios de datos. Las opciones son: Peak RLC Throughput, Effective RLC Throughput y Application Throughput.
- Bearer Selection Criterion: se refiere al método empleado por ATOLL para la selección del mejor Radio Bearer para los cálculos de throughput. Las opciones son:
  - *Bearer Index*: se selecciona el *Radio Bearer* con mayor índice entre los disponibles en el equipo de recepción.

- Peak RLC Throughput: se selecciona el Radio Bearer con el que se obtiene el mayor Peak RLC Throughput entre los disponibles en el equipo de recepción.
- Effective RLC Throughput: se selecciona el Radio Bearer con el que se obtiene el mayor Effective RLC Throughput entre los disponibles en el equipo de recepción.
- Uplink Bandwidth Allocation Target: establece el objetivo en la asignación de los recursos para el enlace ascendente. Las opciones son:
  - Full Bandwidth: se utilizan todos los Frequency Blocks para el cálculo de la C/(I+N) de los canales PUSCH y PUCCH.
  - Mantain Connection: el número de Frequency Blocks se reduce uno a uno para incrementar la C/(I+N) de los canales PUSCH y PUCCH para que el móvil pueda obtener por lo menos el menor Bearer posible.
  - Best Bearer: el número de Frequency Blocks se reduce uno a uno para incrementar la C/(I+N) de los canales PUSCH y PUCCH para que el móvil pueda obtener el mejor Bearer posible.

En ATOLL la asignación de recursos se lleva a cabo por el *scheduler* de acuerdo a los pasos descritos a continuación:

1. Selección de los usuarios para la asignación de los recursos

Para el proceso de asignación de recursos el *scheduler* selecciona  $N_{Users}^{TX_i}$  usuarios del total de usuarios generados por la simulación Monte Carlo  $\left(N_{Users-generated}^{TX_i}\right)$  según se haya definido el *Max Number of Users*  $\left(N_{users-Max}^{TX_i}\right)$  para cada celda. Es decir:

$$N_{Users}^{TX_i} = Min(N_{users-Max}^{TX_i}, N_{Users-generated}^{TX_i})$$
 (4.1)

Si no se establece una limitación del número de usuarios máximo por celda, el *scheduler* selecciona a todos los usuarios generados en la simulación. Cabe mencionar que el término  $TX_i$  hace referencia a la celda i en cuestión.

#### 2. Cálculo de las demandas mínimas y máximas de throughput

Dependiendo del *Target Throughput* seleccionado en las propiedades del *scheduler* las demandas mínimas y máximas de *throughput* de cada servicio son calculadas de la siguiente manera:

### - Target Throughput = Peak RLC Throughput

Las demandas mínimas y máximas de *throughput* en el *downlink* y en el *uplink* serán iguales a las establecidas directamente en las propiedades del servicio que utiliza el usuario  $M_i^{Sel} \in N_{Users}^{TX_i}$  tal y como se muestra en la Tabla 4.2. En el caso de la demanda máxima del *uplink* se toma el valor mínimo entre la demanda máxima establecida en el servicio o la calculada según el número de *Frequency Blocks* asignados al usuario, es decir, según el *Allocated Bandwidth Throughput*  $(ABTP_{P-III}^{M_i})$ .

	Min Throughput Demand	Max Throughput Demand
DL	$TPD_{Min-DL}^{M_{\tilde{l}}^{Sel}}$	$TPD_{Max-DL}^{M_i^{Sel}}$
UL	$TPD_{Min-UL}^{M_i^{Sel}}$	$Min\left(TPD_{Max-UL}^{M_i^{Sel}}, ABTP_{P-UL}^{M_i}\right)$

 Tabla 4.2: Demandas de throughput para Target = Peak RLC Throughput.

#### - *Target Throughput = Effective RLC Throughput*

En este caso las demandas mínimas y máximas de *throughput* en el *downlink* y en el *uplink* serán siempre iguales o superiores al caso del *Target Throughput* 

establecido en *Peak RLC Throughput* porque se toma en cuenta la BLER (*Block Error Rate*) del *Radio Bearer* seleccionado por el usuario  $M_i^{Sel} \in N_{Users}^{TX_i}$ . En la Tabla 4.3 se muestran las fórmulas.

	Min Throughput Demand	Max Throughput Demand
DL	$TPD_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}}}{\left(1 - BLER\left(B_{DL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right)}$	$TPD_{Max-DL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Max-DL}^{M_{i}^{Sel}}}{\left(1 - BLER\left(B_{DL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right)}$
UL	$TPD_{Min-UL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Min-UL}^{M_{i}^{Sel}}}{\left(1 - BLER\left(B_{UL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right)}$	$TPD_{Max-UL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{Min\left(TPD_{Max-UL}^{M_{i}^{Sel}}, ABTP_{P-UL}^{M_{i}}\right)}{\left(1 - BLER\left(B_{UL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right)}$

**Tabla 4.3:** *Demandas de throughput para Target =Effective RLC Throughput.* 

### - Target Throughput = Application Throughput

ATOLL modela el throughput de la capa de aplicación mediante un Throughput Offset  $(TP_{Offset}^{M_i})$  y un Scaling Factor  $(f_{TP-Scaling}^{M_i})$  con respecto al throughput de la capa RLC que permiten suprimir la información de encabezados y otros tipos de información que no aparecen en la capa de aplicación. Por esto, las demandas mínimas y máximas de throughput en el downlink y en el uplink serán superiores a los otros dos casos. En la Tabla 4.4 se muestran las fórmulas.

	Min Throughput Demand	Max Throughput Demand
DL	$TPD_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}} + TP_{Offset}^{M_{i}}}{\left(1 - BLER\left(B_{DL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right) \times f_{TP-Scaling}^{M_{i}}}$	$TPD_{Max-DL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Max-DL}^{M_{i}^{Sel}} + TP_{Offset}^{M_{i}}}{\left(1 - BLER\left(B_{DL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right) \times f_{TP-Scaling}^{M_{i}}}$
UL	$TPD_{Min-UL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Min-UL}^{M_{i}^{Sel}} + TP_{Offset}^{M_{i}}}{\left(1 - BLER\left(B_{UL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right) \times f_{TP-Scaling}^{M_{i}}}$	$TPD_{Max-UL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{Min\left(TPD_{Max-UL}^{M_{i}^{Sel}}, ABTP_{P-UL}^{M_{i}}\right) + TP_{Offset}^{M_{i}}}{\left(1 - BLER\left(B_{UL}^{M_{i}^{Sel}}\right)\right) \times f_{TP-Scaling}^{M_{i}}}$

**Tabla 4.4:** Demandas de throughput para Target = Application Throughput.

### 3. Asignación de los recursos para satisfacer las demandas mínimas de throughput

Las demandas mínimas de *throughput* son las tasas de datos mínimas que un servicio específico debe obtener para poder trabajar apropiadamente. Si el *scheduler* no consigue asignar la cantidad de recursos necesaria para satisfacer las demandas mínimas de *throughput* del servicio de un usuario, entonces el usuario no recibe ningún recurso y será rechazado debido a "*Resource Saturation*".

Para asignar los recursos ATOLL primero ordena los usuarios  $M_i^{Sel} \in N_{Users}^{TX_i}$  según el *scheduler* seleccionado. Si se trata de *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF) o *Proportional Demand* (PD), se ordenan de manera descendente según la prioridad de sus servicios  $(p^{M_i^{Sel}})$ , mientras que para la estrategia *Maximum C/I* (Max C/I) se ordenan de manera descendente según la C/(I+N) del canal PDSCH, para el *downlink*, o de los canales PUSCH y PUCCH, para el *uplink*.

Empezando por  $M_i^{Sel} = 1$  hasta  $M_i^{Sel} = N_{Users}^{TX_i}$  ATOLL asigna los recursos en el downlink y en el uplink necesarios para satisfacer las demandas mínimas de throughput de cada usuario. El cálculo de los recursos se realiza según se muestra en las ecuaciones 4.2 y 4.3.

$$R_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}}}{CTP_{P-DL}^{M_{i}^{Sel}}}$$
(4.2)

$$R_{Min-UL}^{M_i^{Sel}} = \frac{TPD_{Min-UL}^{M_i^{Sel}}}{CTP_{P-UL}^{M_i^{Sel}}}$$
(4.3)

Donde  $CTP_{P-DL}^{M_i^{Sel}}$  y  $CTP_{P-UL}^{M_i^{Sel}}$  corresponden al *Peak Channel Throughput* en el *downlink* y en el *uplink* respectivamente y son calculados según las ecuaciones 4.4 y 4.5 para el caso de los *schedulers* RR, PD y Max C/I, y según las ecuaciones 4.6 y 4.7 para el *scheduler* PF:

$$CTP_{P-DL}^{M_i^{Sel}} = \frac{R_{DL}^{TX_i} \times \eta_{B_{DL}}^{M_i}}{D_{Frame}}$$

$$\tag{4.4}$$

$$CTP_{P-UL}^{M_i^{Sel}} = \frac{R_{UL}^{TX_i} \times \eta_{B_{UL}}^{M_i}}{D_{Frame}}$$
(4.5)

$$CTP_{P-DL}^{M_i^{Sel}} = \frac{R_{DL}^{TX_i} \times \eta_{B_{DL}}^{M_i}}{D_{Erame}} \times G_{MUG-DL}^{TX_i}$$

$$\tag{4.6}$$

$$CTP_{P-UL}^{M_i^{Sel}} = \frac{R_{UL}^{TX_i} \times \eta_{B_{UL}}^{M_i}}{D_{Frame}} \times G_{MUG-UL}^{TX_i}$$

$$\tag{4.7}$$

 $R_{DL}^{TX_i}$  y  $R_{UL}^{TX_i}$  representan la cantidad total de recursos en el *downlink* y en el *uplink* de la celda  $TX_i$ ,  $\eta_{B_{DL}}^{M_i}$  y  $\eta_{B_{UL}}^{M_i}$  representan la eficiencia espectral del *Radio Bearer* seleccionado por el usuario  $M_i$  en el *downlink* y en el *uplink*,  $D_{Frame}$  es la duración de la trama LTE (en el caso de las simulaciones es igual a 1s porque se realiza la asignación de recursos en 100 tramas LTE, cada una de 10 ms) y  $G_{MUG-DL}^{TX_i}$  y  $G_{MUG-UL}^{TX_i}$  representan la ganancia de diversidad multiusuario asignada al usuario  $M_i$  en función del número de usuarios conectados en el *downlink* o en el *uplink* en la celda  $TX_i$ .

ATOLL finaliza la asignación de recursos en el *downlink* o en el *uplink* cuando se han asignado todos los recursos disponibles de la celda para satisfacer las demandas mínimas de *throughput* de los usuarios, es decir, cuando el número de recursos totales utilizados para asignar las demandas mínimas es igual al *Max Traffic Load* de la celda  $TX_i$ , tal y como se muestra en las ecuaciones 4.8 y 4.9.

$$\sum_{M_i^{Sel}} R_{Min-DL}^{M_i^{Sel}} = TL_{DL-Max}^{TX_i} \tag{4.8}$$

$$\sum_{M_i^{Sel}} R_{Min-UL}^{M_i^{Sel}} = TL_{UL-Max}^{TX_i}$$

$$\tag{4.9}$$

Aquellos usuarios con *status* "Active DL+UL" deben haber conseguido sus demandas mínimas de *throughput* en ambos enlaces para poder ser considerados "Connected DL+UL", de lo contrario son rechazados por "Resource Saturation" y los recursos que le habían sido asignados se utilizan para otros usuarios.

Los usuarios que tienen un *Min Throughput Demand* mayor a las capacidades de su equipo terminal son rechazados debido a "*No Service*". Esto sucede cuando:

$$R_{Min-DL}^{M_i^{Sel}} > \frac{TP_{UE-DL}^{Max}}{CTP_{P-DL}^{M_i^{Sel}}} \tag{4.10}$$

$$R_{Min-UL}^{M_i^{Sel}} > \frac{TP_{UE-UL}^{Max}}{CTP_{D-UL}^{M_i^{Sel}}}$$

$$(4.11)$$

Los usuarios con *status* "Active UL" cuyos Min Throughput Demand sean mayores al Allocated Bandwidth Throughput son rechazados de igual manera por "Resource Saturation".

#### 4. Asignación de los recursos para satisfacer las demandas máximas de throughput:

Si en una celda  $TX_i$  se han asignado los recursos necesarios para satisfacer las demandas mínimas de todos los usuarios y aún así quedan recursos libres (ecuaciones 4.12 y 4.13), el siguiente paso para ATOLL es asignar esos recursos restantes para satisfacer las demandas máximas de *throughput* de los usuarios.

$$\sum_{M_i^{Sel}} R_{Min-DL}^{M_i^{Sel}} < T L_{DL-Max}^{TX_i}$$

$$\tag{4.12}$$

$$\sum_{M_i^{Sel}} R_{Min-UL}^{M_i^{Sel}} < TL_{UL-Max}^{TX_i}$$

$$\tag{4.13}$$

Los recursos restantes son calculados como la diferencia entre los *Max Traffic Loads* y el total de recursos asignados para satisfacer las demandas mínimas

(ecuaciones 4.14 y 4.15). Por otro lado, para cada usuario  $M_i$  se calcula la demanda de *throughput* restante como el menor valor entre la diferencia del *Max Throughput Demand* y el *Min Throughput Demand* o la capacidad máxima del equipo de dicho usuario (ecuaciones 4.16 y 4.17).

$$R_{Rem-DL}^{TX_{i}} = TL_{DL-Max}^{TX_{i}} - \sum_{M_{i}^{Sel}} R_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}}$$
(4.14)

$$R_{Rem-UL}^{TX_{i}} = TL_{UL-Max}^{TX_{i}} - \sum_{M_{i}^{Sel}} R_{Min-UL}^{M_{i}^{Sel}}$$
(4.15)

$$TPD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}} = Min\left(TPD_{Max-DL}^{M_i^{Sel}} - TPD_{Min-DL}^{M_i^{Sel}}, TP_{UE-DL}^{Max}\right) \tag{4.16}$$

$$TPD_{Rem-UL}^{M_i^{Sel}} = Min\left(TPD_{Max-UL}^{M_i^{Sel}} - TPD_{Min-UL}^{M_i^{Sel}}, TP_{UE-UL}^{Max}\right) \tag{4.17}$$

Los algoritmos empleados por ATOLL para asignar los recursos a fin de satisfacer las demandas máximas de *throughput* de los usuarios dependen del *scheduler* seleccionado y son:

#### - Round Robin:

El objetivo de esta estrategia es asignar la misma cantidad de recursos a los usuarios de manera justa. Para ello, ATOLL divide la cantidad de recursos restantes de cada celda entre el número de usuarios de dicha celda, tal y como se muestra en las ecuaciones 4.18 y 4.19.

$$\frac{R_{Rem-DL}^{TX_i}}{N_{Users-DL}^{TX_i}} \tag{4.18}$$

$$\frac{R_{Rem-UL}^{TX_i}}{N_{Users-UL}^{TX_i}} \tag{4.19}$$

Posteriormente se calcula el número de recursos que cada usuario necesita para obtener su demanda de *throughput* restante tal y como se muestra en las ecuaciones 4.20 y 4.21.

$$RD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}} = \frac{TPD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}}}{CTP_{P-DL}^{M_i^{Sel}}}$$
(4.20)

$$RD_{Rem-UL}^{M_i^{Sel}} = \frac{TPD_{Rem-UL}^{M_i^{Sel}}}{CTP_{P-UL}^{M_i^{Sel}}}$$
(4.21)

Finalmente, los recursos asignados a cada usuario mediante la estrategia RR se definen según las ecuaciones 4.22 y 4.23.

$$R_{Max-DL}^{M_i^{Sel}} = Min\left(\frac{R_{Rem-DL}^{TX_i}}{N_{Users-DL}^{TX_i}}, RD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}}\right)$$
(4.22)

$$R_{Max-UL}^{M_i^{Sel}} = Min\left(\frac{R_{Rem-UL}^{TX_i}}{N_{Users-UL}^{TX_i}}, RD_{Rem-UL}^{M_i^{Sel}}\right)$$
(4.23)

Cada usuario que logra obtener su demanda máxima de *throughput* es eliminado de la lista de usuarios restantes de la celda  $TX_i$ . Posteriormente ATOLL recalcula los recursos restantes de dicha celda (ecuaciones 4.24 y 4.25) antes de seguir el proceso de asignación de recursos con el próximo usuario.

$$R_{Rem-DL}^{TX_{i}} = TL_{DL-Max}^{TX_{i}} - \sum_{M_{i}^{Sel}} R_{Min-DL}^{M_{i}^{Sel}} - \sum_{M_{i}^{Sel}} R_{Max-DL}^{M_{i}^{Sel}}$$
(4.24)

$$R_{Rem-UL}^{TX_i} = TL_{UL-Max}^{TX_i} - \sum_{M_i^{Sel}} R_{Min-UL}^{M_i^{Sel}} - \sum_{M_i^{Sel}} R_{Max-UL}^{M_i^{Sel}}$$
(4.25)

ATOLL finaliza la asignación de recursos en el *downlink* o en el *uplink* cuando se han agotado todos los recursos restantes de la celda (ecuaciones 4.26 y 4.27) o

cuando todos los usuarios de la celda han obtenido el máximo *throughput* demandado.

$$R_{Rem-DL}^{TX_i} = 0 (4.26)$$

$$R_{Rem-UL}^{TX_i} = 0 (4.27)$$

### - Proportional Fair:

El objetivo de esta estrategia es distribuir los recursos entre los usuarios de manera tal que cada usuario obtenga el mayor *throughput* posible que éste puede obtener en media bajo las condiciones de su ubicación. Sin embargo, como las simulaciones se realizan para un instante de tiempo y no tienen memoria, el algoritmo que emplea ATOLL para la estrategia PF es el mismo que el descrito para la estrategia RR excepto que los *Channel Throughputs* que observan los usuarios se ven incrementados por la ganancia de diversidad multiusuario, tal y como se definieron en las ecuaciones 4.6 y 4.7.

Cabe destacar que las ganancias de diversidad multiusuario se establecen igual a 1 si la C/(I+N) que obtiene el usuario  $M_i$  es superior a la máxima C/(I+N) definida en las propiedades del *scheduler* PF, tal y como se muestra en las ecuaciones 4.28 y 4.29.

$$G_{MUG-DL}^{TX_i} = 1$$
 si  $CINR_{PDSCH}^{M_i^{Sel}} \ge CINR_{MUG}^{Max}$  (4.28)

$$G_{MUG-UL}^{TX_i} = 1 \quad si \quad CINR_{PUSCH,PUCCH}^{M_i^{Sel}} \ge CINR_{MUG}^{Max}$$
 (4.29)

#### - Proportional Demand:

El objetivo de esta estrategia es asignar recursos a los usuarios ponderados de acuerdo a sus demandas de *throughput* restantes. Por lo tanto, el *User Throughput* de los usuarios con mayores *Max Throughput Demands* será mayor que el de

aquellos con menores *Max Throughput Demand*. Para esto ATOLL primero calcula los recursos que cada usuario necesita para obtener su demanda de *throughput* restante tal y como se ha definido en las ecuaciones 4.20 y 4.21.

Posteriormente se calcula la cantidad efectiva de recursos restantes de cada celda para distribuir entre los usuarios atendidos por cada una de ellas, tal y como se muestra en las ecuaciones 4.30 y 4.31.

$$R_{Eff-Rem-DL}^{TX_i} = Min\left(R_{Rem-DL}^{TX_i}, \sum_{M_i^{Sel}} RD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}}\right)$$
(4.30)

$$R_{Eff-Rem-UL}^{TX_i} = Min\left(R_{Rem-UL}^{TX_i}, \sum_{M_i^{Sel}} RD_{Rem-UL}^{M_i^{Sel}}\right)$$
(4.31)

Por último, los recursos asignados a cada usuario mediante el *scheduler* PD para satisfacer las demandas máximas de *throughput* se llevan a cabo según se indican en las ecuaciones 4.32 y 4.33.

$$R_{Max-DL}^{M_i^{Sel}} = R_{Eff-Rem-DL}^{TX_i} \times \frac{RD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}}}{\sum_{M_i^{Sel}} RD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}}}$$
(4.32)

$$R_{Max-UL}^{M_{i}^{Sel}} = R_{Eff-Rem-UL}^{TX_{i}} \times \frac{RD_{Rem-UL}^{M_{i}^{Sel}}}{\sum_{M_{i}^{Sel}} RD_{Rem-UL}^{M_{i}^{Sel}}}$$
(4.33)

#### - Maximum C/I:

El objetivo de esta estrategia es alcanzar el máximo *Aggregate Throughput* para cada celda. Esto se consigue asignando los recursos a los usuarios con las mejores condiciones de C/(I+N), es por esto que ATOLL ordena los usuarios por orden decreciente según la C/(I+N) a diferencia de las demás estrategias.

Empezando desde el usuario con la mejor condición de canal, se asignan los recursos para satisfacer las demandas máximas de *throughput* según se muestra en las ecuaciones 4.34 y 4.35.

$$R_{Max-DL}^{M_i^{Sel}} = \frac{TPD_{Rem-DL}^{M_i^{Sel}}}{CTP_{P-DL}^{M_i^{Sel}}}$$
(4.34)

$$R_{Max-UL}^{M_{i}^{Sel}} = \frac{TPD_{Rem-UL}^{M_{i}^{Sel}}}{CTP_{P-UL}^{M_{i}^{Sel}}}$$
(4.35)

ATOLL finaliza la asignación de recursos en el *downlink* o en el *uplink* cuando se han asignado todos los recursos restantes de la celda para satisfacer las demandas máximas de *throughput* (ecuaciones 4.36 y 4.37) o cuando todos los usuarios de la celda han obtenido el máximo *throughput* demandado.

$$\sum_{M_i^{Sel}} R_{Max-DL}^{M_i^{Sel}} = R_{Rem-DL}^{TX_i} \tag{4.36}$$

$$\sum_{M_i^{Sel}} R_{Max-UL}^{M_i^{Sel}} = R_{Rem-UL}^{TX_i} \tag{4.37}$$

### IV.1.5 MIMO (Multiple Input Multiple Output) Systems

En ATOLL es posible modelar los sistemas MIMO en las redes LTE utilizando distintas técnicas de transmisión y recepción que se clasifican de la siguiente manera:

#### - Diversidad en Transmisión y Recepción

Consiste en emplear más de una antena de transmisión y/o recepción para enviar y recibir más de una copia de la misma señal. En el receptor las señales recibidas son combinadas constructivamente por lo que el nivel de señal es más resistente a

interferencias de lo que sería una sola señal. En los sistemas reales la combinación de las señales se logra empleado el método de combinación por selección óptima o combinación MRC (*Maximum Ratio Combining*), sin embargo, en ATOLL se modela mediante una ganancia de diversidad que establece el usuario que permite incrementar directamente la C/(I+N) de la señal en el receptor.

De esta manera, en ATOLL se puede definir para cada celda el tipo de diversidad que emplea así como las ganancias en el *downlink* y en el *uplink* para los equipos receptores en función de diferentes combinaciones de número de antenas de transmisión y recepción, movilidades, *Radio Bearers* y BLER.

Durante los cálculos de las simulaciones, los usuarios que utilicen un terminal MIMO y que estén conectados a una celda que emplee diversidad en transmisión y/o recepción verán incrementados sus C/(I+N) por las ganancias de diversidad.

#### - Multiplexación espacial o *Single-User MIMO* (*SU-MIMO*)

SU-MIMO consiste en emplear más de una antena de transmisión para enviar diferentes señales (*data streams*) por cada una. El receptor a su vez puede emplear más de una antena para recibir las distintas señales. Al utilizar SU-MIMO con M antenas transmisoras y N antenas receptoras, teóricamente se incrementa el *throughput* M o N veces, según el valor menor, en el enlace del transmisor al receptor. Con esto se logra aumentar la capacidad del canal para una C/(I+N) dada. Esta técnica se emplea cuando las condiciones de C/(I+N) son buenas.

Al igual que en el caso de diversidad en transmisión y recepción, en ATOLL se puede definir independientemente para cada celda si se emplea SU-MIMO y las ganancias se definen en los equipos de recepción en función del número de antenas transmisoras y receptoras, movilidades, *Radio Bearers* y BLER.

Durante los cálculos de las simulaciones, los usuarios que utilicen un terminal MIMO y que estén conectados a una celda que emplee SU-MIMO verán incrementados sus *Channel Throughputs* dependiendo de la C/(I+N) de los canales PDSCH o PUSCH.

#### - Adaptative MIMO Switch (AMS)

ATOLL permite emplear esta técnica para conmutar entre el uso de SU-MIMO a diversidad en transmisión y recepción a medida que las condiciones del canal empeoran. En este sentido, los usuarios que tengan una C/(I+N) superior a un umbral definido como AMS *Threshold* podrán beneficiarse por las ganancias de SU-MIMO, mientras que aquellos que se encuentren por debajo del umbral aplicarán las ganancias de diversidad en transmisión y recepción.

#### - Multi-User MIMO (MU-MIMO)

En ATOLL, MU-MIMO es una técnica que puede ser empleada en el *uplink* en aquellas celdas que tienen más de una antena receptora y consiste en multiplexar a dos usuarios que presenten buenas condiciones de canal (por encima de un umbral definido en ATOLL como *MU-MIMO Threshold*) en un mismo recurso en el dominio frecuencia-tiempo. Esta técnica proporciona un incremento considerable en las capacidades de las celdas en el *uplink* y puede ser empleada con solo una antena transmisora en los terminales de los usuarios.

Las ganancias por MU-MIMO pueden definirse directamente en el *Cells Table* o pueden ser calculadas durante las simulaciones Monte Carlo como resultado del proceso de *scheduling* y RRM. Al usar MU-MIMO, los *schedulers* son capaces de asignar recursos sobre dos tramas paralelas multiplexadas espacialmente en el mismo plano frecuencia-tiempo. Para ello, un móvil conectado a la antena 1 crea una cantidad de recursos virtuales disponibles en la segunda antena que serán asignados al siguiente usuario sin incrementar el tráfico total de la celda. De esta manera, cada nuevo móvil que se conecta consume los recursos virtuales hechos

disponibles por el móvil anterior y, si es necesario, consumirá nuevos recursos reales creando al mismo tiempo nuevos recursos virtuales en la otra antena. La ganancia MU-MIMO resultante es la relación entre los *Traffic Loads* de todos los móviles conectados a las dos tramas paralelas en el *uplink* y el *UL Traffic Load* de la celda. Para las predicciones de cobertura, los *Channel Throughputs* son incrementados por la ganancia en cada píxel del mapa que emplee esta diversidad.

Según lo mencionado anteriormente, para usar MU-MIMO se debe cumplir que la relación señal a ruido de las señales de referencia deben superar el umbral MU-MIMO (ecuación 4.38) y la celda debe disponer de al menos dos antenas de recepción (ecuación 4.39).

$$CNR_{DLRS}^{TX_i} > T_{MU-MIMO}^{TX_i} \tag{4.38}$$

$$N_{Ant-Rx}^{TX_i} \ge 2 \tag{4.39}$$

Cada móvil  $M_i^{MU-MIMO}$  tiene su correspondiente carga de tráfico en el *uplink*  $TL_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}}$  donde i representa el índice de los N usuarios conectados con terminales que emplean MU-MIMO. El *scheduler* comienza el algoritmo con una cantidad de recursos reales disponibles  $RR_{UL}^{M_{i=0}^{MU-MIMO}} = 100\%$  y una cantidad de recursos virtuales  $\Delta V_{UL}^{M_{i=0}^{MU-MIMO}} = 0\%$ , donde i=0 significa que a ningún móvil se le ha asignado recursos. El consumo de los recursos virtuales y de los recursos reales se calcula según las ecuaciones 4.40 y 4.41 respectivamente.

$$VC_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}} = Min\left(TL_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}}, \Delta V_{UL}^{M_{i-1}^{MU-MIMO}}\right)$$
(4.40)

$$RC_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}} = TL_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}} - VC_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}}$$
(4.41)

La cantidad de recursos virtuales hechos disponibles por un usuario  $M_i^{MU-MIMO}$  se calculan según la ecuación 4.42.

$$\Delta V_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}} = \Delta V_{UL}^{M_{i-1}^{MU-MIMO}} - V C_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}} + R C_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}}$$
(4.42)

El algoritmo se detiene cuando el consumo real de los recursos es igual al *Max UL Traffic Load* como se muestra en la ecuación 4.43.

$$\sum RC_{UL}^{M_i^{MU-MIMO}} = TL_{UL-Max}^{TX_i} \tag{4.43}$$

### IV.2 Planificación de la red LTE en ATOLL

Una vez explicados aquellos elementos y aspectos de ATOLL necesarios para la comprensión de este proyecto, en este apartado se explicará el proceso de planificación de la red LTE en ATOLL.

#### IV.2.1 Despliegue de la red

ATOLL es una herramienta que permite planificar redes de múltiples tecnologías de comunicaciones móviles, en este caso se creó un proyecto del tipo LTE seleccionando el *Template LTE*. El primer paso en la planificación de la red LTE fue seleccionar la zona geográfica donde se realizaría el despliegue, en este sentido se importaron los mapas de altimetría (*Height*), ortofoto (*Image*), vectorial (*Vector*) y de uso del terreno (*Clutter Classes*) correspondientes a la ciudad de Barcelona con una resolución de 20 m.

Antes de definir los *Sites*, *Transmitters* y *Cells* de la red, se creó una plantilla LTE basada en la plantilla existente LTE: 5 MHz - Urban (3 sectors) con las características globales que tendrían todos los transmisores de la red, y se decidió usar la Banda 1 con un ancho de banda de canal de 5 MHz como banda de frecuencia de trabajo.

La Tabla 4.5 reúne las características de la plantilla LTE creada.

	Parámetro	Valor
	Sectors	3
	Hexagon radius	0 m
	1st sector azimuth	0 °
	Height/ground	30 m
	Mechanical downtilt	0 °
eral	Additional electrical downtilt	0 °
General	Main anntena model	65deg 18dBi 4Tilt 2100MHz
	Number of anntena ports (transmission)	1
	Number of antenna ports (reception)	1
	Main propagation model	Default model (Cost-Hata)
	Main radius	4000 m
	Main resolution	20 m
	TMA	Default TMA Equipment
	Feeder	1/2" at 2100 MHz
	Transmitter equipment	Default eNode-B Equipment
er	Feeder length (transmission)	5 m
nitt	Feeder length (reception)	5 m
Transmitter	Miscellaneous losses (transmission)	0 dB
Tra	Miscellaneous losses (reception)	0 dB
	Total losses (transmission)	1.51 dB
	Total losses (reception)	-2.09 dB
	Noise figure	4 dB
	Max power	40 dBm
	SS, PBCH, PDCCH, PDSCH offsets	0 dB
	Frequency band	2110 FDD – 5 MHz (E-UTRAN Band 1)
	Reception equipment	Default Cell Equipment
	Scheduler	Proportional Fair
	Max number of users	-
TE	Min RSRP	-140 dBm
5	Diversity support (Downlink)	-
	Diversity support (Uplink)	-
	DL traffic load	100 %
	Max DL traffic load	100 %
	UL traffic load	100 %
	Max UL traffic load	100 %
	UL noise rise (intra-technology)	6 dB
Neighbours	Max number of neighbours	16
	(intra-technology)	
ght	Max number of neighbours	16
Neig	(inter-technology)	
	<u> </u>	

Tabla 4.5: Parámetros de la Plantilla LTE.

Posteriormente se importaron los *Sites, Transmitters* y *Cells* de la red según las coordenadas y datos de trabajos previos del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles y se definió una zona de cálculo (*Computation Zone*) abarcando la zona de interés para reducir los cálculos y por ende el tiempo de simulación.

En la Figura 4.3 se muestra el despliegue de la red y el *Computation Zone* definido por el polígono de línea roja.



Figura 4.3: Computation Zone de la red LTE.

### IV.2.2 Configuración del modelo de propagación

Se seleccionó el modelo de propagación *Cost-Hata* por ser un modelo adecuado para la banda de frecuencia definida para LTE y se definió como modelo por defecto para el cómputo de las predicciones realizadas. Para adaptarlo al entorno desplegado, se asociaron las fórmulas de dicho modelo a las distintas clases de *clutter*.

La Tabla 4.6 muestra la configuración del modelo de propagación *Cost-Hata*.

Formulas assigned to clutter classes		
1. Open	Rural (open area)	
2. Sea	Rural (open area)	
3. Inland water	Rural (open area)	
4. Residential	Metropolitan center	
5. Mean urban	Metropolitan center	
6. Dense urban	Metropolitan center	
7. Buildings	Metropolitan center	
8. Village	Metropolitan center	
9. Industrial	Metropolitan center	
10. Open in urban	Rural (quasi-open)	
11. Forest	Rural (open area)	
12. Parks	Rural (open area)	
13. Scattered urban	Metropolitan center	

Tabla 4.6: Parámetros del modelo de propagación Cost-Hata.

#### IV.2.3 Configuración de servicios, terminales, movilidades y perfiles de usuario

Se emplearon los servicios definidos por ATOLL en el *Template LTE*, sin embargo, se modificaron algunos valores de máxima y mínima demanda de *throughput* que estaban definidos por defecto con el fin de apreciar de mejor manera el impacto de las distintas estrategias de *Packet Scheduling* en las simulaciones realizadas posteriormente. Específicamente para el servicio *FTP Download* se asignó

una demanda mínima de *throughput* distinta de 0 kbps como venía definida, mientras que en el caso de los servicios *Video Conferencing* y VoIP se establecieron valores distintos para las demandas mínima y máxima de *throughput*, que originalmente eran iguales.

La Tabla 4.7 reúne las características de los servicios utilizados en la red LTE.

	FTP Download	Web Browsing	Video	VoIP
			Conferencing	
Type	Data	Data	Voice	Voice
Priority	0	1	2	3
Activity factor (DL)	1	1	0.5	0.6
Activity factor (UL)	1	1	0.5	0.6
Average requested throughput (DL)	256 kbps	64 kbps	64 kbps	12.2 kbps
Average requested throughput (UL)	32 kbps	32 kbps	64 kbps	12.2 kbps
Highest bearer (DL)	15	15	15	15
Highest bearer (UL)	15	15	15	15
Lowest bearer (DL)	1	1	1	1
Lowest bearer (UL)	1	1	1	1
Max throughput demand (DL)	1024 kbps	256 kbps	128 kbps	24.4 kbps
Max throughput demand (UL)	128 kbps	128 kbps	128 kbps	24.4 kbps
Min throughput demand (DL)	10 kbps	64 kbps	64 kbps	12.2 kbps
Min throughput demand (UL)	10 kbps	32 kbps	64 kbps	12.2 kbps
Scaling factor	95 %	95 %	95 %	95 %
Offset	0 kbps	0 kbps	0 kbps	0 kbps
Body loss	0 dB	0 dB	0 dB	3 dB

**Tabla 4.7:** Parámetros de los servicios de la red LTE.

Se establecieron las antenas a utilizar por los terminales móviles ya que por defecto utilizaban antenas isotrópicas ideales con diagramas esféricos de propagación en los planos vertical y horizontal, y se fijó una altura de receptor de 1.5 m.

La Tabla 4.8 reúne las características de los terminales móviles utilizados en la red LTE.

	Mobile Terminal	MIMO Terminal
Min power	-40 dBm	-40 dBm
Max power	23 dBm	23 dBm
Noise figure	8 dB	8 dB
Losses	0 dB	0 dB
LTE equipment	Default UE equipment	Default UE equipment
UE category	UE Category 5	UE Category 5
Antenna model	Omni 11dBi 0Tilt 2100MHz	Omni 11dBi 0Tilt 2100MHz
Diversity support	None	MIMO
MIMO Number of	-	2
transmission antenna ports		
MIMO Number of reception	-	2
antenna ports		

**Tabla 4.8:** Características de los terminales de la red LTE.

Los tipos de movilidad y los perfiles de usuario se mantuvieron con los valores definidos por defecto en ATOLL para todas las simulaciones y predicciones.

Las Tablas 4.9 y 4.10 reúnen las características de los tipos de movilidad y perfiles de usuarios respectivamente.

Mobility Type	Speed
50 km/h	50 km/h
90 km/h	90 km/h
Fixed	0 km/h
Pedestrian	3 km/h

Tabla 4.9: Tipos de movilidad de usuarios de la red LTE.

	Service	Terminal	Calls/hour	Duration	UL Volume	DL Volume
				(sec.)	(KBytes)	(KBytes)
	FTP Download	MIMO Terminal	0.01		2000	15000
Business	Video Conferencing	MIMO Terminal	0.01	600		
User	VoIP	Mobile Terminal	0.2	240		
	Web Browsing	MIMO Terminal	0.1		700	4500
Standard	Web Browsing	MIMO Terminal	0.1		700	4500
User	VoIP	Mobile Terminal	0.2	240		

**Tabla 4.10:** Características de los perfiles de usuarios de la red LTE.

#### IV.2.4 Estudios de cobertura por nivel de señal

Para comprobar que el despliegue de la red fuera adecuado se realizó un estudio de cobertura por nivel de señal del tipo *Coverage by Signal Level* para una sensibilidad igual a -124 dBm. El resultado de la cobertura se muestra en la Figura 4.4. Se puede apreciar que las estaciones base desplegadas cubren la zona de interés con niveles de señal por encima de la sensibilidad definida, por lo cual se decidió proceder a la fase de optimización de la red.

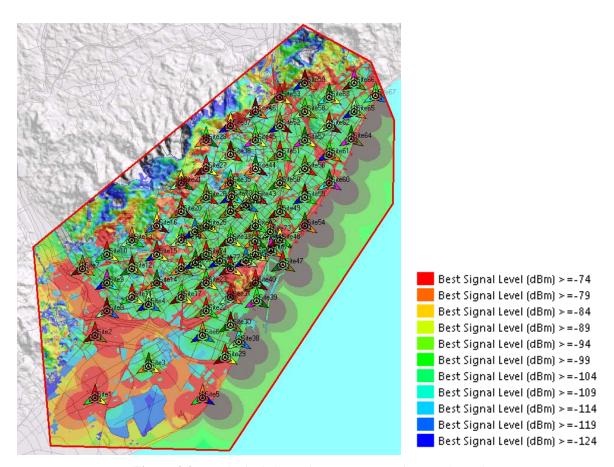


Figura 4.4: Resultado de la predicción Coverage by Signal Level.

#### IV.3 Optimización de la red LTE

La optimización de la red LTE en ATOLL consiste en la creación de los mapas de tráfico, la asignación de vecinos, la planificación de frecuencias y la asignación de los *Physicall Cell IDs*.

#### IV.3.1 Mapas de tráfico

Se creó un mapa de tráfico acorde a los datos reales de la ciudad de Barcelona con los *Environments* definidos por defecto en ATOLL. Las densidades de usuarios para cada *Environment* fueron modificadas dependiendo de los objetivos de cada simulación.

La Tabla 4.11 reúne las características originales de los *Environments*. Cabe destacar que los valores de densidades que sean diferentes a los mostrados en la Tabla 4.11 serán mencionados en las simulaciones respectivas donde hayan sido modificados.

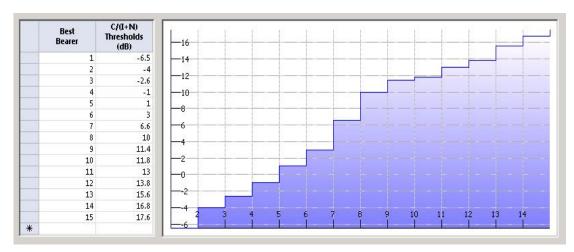
	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
User Profile	Business	Standard	Business	Standard	Standard	Standard
Mobility	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian
Density	800	800	400	400	200	20
(subscribers/km <sup>2)</sup>						

**Tabla 4.11:** Parámetros de los entornos de la red LTE.

Se puede observar en la Tabla 4.11 que ATOLL define únicamente usuarios de tipo *Pedestrian* para cada entorno. Además, los umbrales de selección de los diferentes servicios portadores radio (*Bearer Selection Thresholds*) están definidos en ATOLL con los mismos valores para los cuatro tipos de movilidades. En un entorno real, los umbrales de selección de los *Radio Bearers* sí dependen del tipo de movilidad del usuario, siendo más favorables para los usuarios fijos que para los que se encuentran en movimiento. Sin embargo, en el desarrollo de este proyecto no se modificaron los umbrales, y por lo tanto, tampoco fue necesario agregar usuarios de otras movilidades en los distintos entornos. No obstante, cabe destacar que ATOLL

permite modificar los umbrales de selección de *Radio Bearers* para cada movilidad independientemente, así como agregar otros tipos de usuarios con distintas movilidades dentro de cada entorno definido.

En la Figura 4.5 se muestran los *Bearers Selection Thresholds* definidos por defecto en ATOLL y utilizados en todas las simulaciones.



**Figura 4.5:** Bearer selection thresholds para todas las movilidades de la red LTE.

La Tabla 4.12 muestra las características de los distintos *Radio Bearers*.

Radio Bearer	Name	Modulation	Channel coding	Bearer efficiency
Index			rate	(bits/symbol)
1	QPSK 1/12	QPSK	0.0761719	0.1523
2	QPSK 1/9	QPSK	0.117188	0.2344
3	QPSK 1/6	QPSK	0.188477	0.377
4	QPSK 1/3	QPSK	0.300781	0.6016
5	QPSK 1/2	QPSK	0.438477	0.877
6	QPSK 3/5	QPSK	0.587891	1.1758
7	16QAM 1/3	16QAM	0.369141	1.4766
8	16QAM 1/2	16QAM	0.478516	1.9141
9	16QAM 3/5	16QAM	0.601563	2.4063
10	64QAM 1/2	64QAM	0.455078	2.7305
11	64QAM 1/2	64QAM	0.553711	3.3223
12	64QAM 3/5	64QAM	0.650391	3.9023
13	64QAM 3/4	64QAM	0.753906	4.5234
14	64QAM 5/6	64QAM	0.852539	5.1152
15	64QAM 11/12	64QAM	0.925781	5.5547

**Tabla 4.12:** Características de los Radio Bearers de la red LTE.

#### IV.3.2 Asignación de vecinos

Se realizó una asignación automática de vecinos estableciendo un número máximo de 16 vecinos para la misma tecnología (*Intra-technology*) con una distancia máxima entre vecinos de 4000 m. Se impuso que el algoritmo realizara los cálculos considerando *shadowing* para una probabilidad de cobertura del 85% en el borde de la celda, un margen de histéresis (RSRP *Margin*) de 5 dB entre la zona de cobertura de la celda servidora y las celdas vecinas y un porcentaje del 10 % de solape (% *Min Covered Area*) entre las celdas servidora y vecina para ser consideradas vecinas.

#### IV.3.3 Planificación de frecuencias

Se realizó una planificación automática de frecuencias tomando en cuenta la asignación de los vecinos realizada previamente y restringiendo al algoritmo para asignar solo los canales 0, 1 y 2 de los 12 posibles canales de 5 MHz de la banda utilizada en la red (2110 FDD – 5 MHz (E-UTRAN Band 1)). Con esta planificación se reducen las interferencias intercelulares a costo de un aumento del espectro utilizado por el operador que pasó de 5 MHz a 15 MHz.

#### IV.3.4 Planificación del Physical Cell ID

Se realizó una asignación automática del *Physical Cell ID* para cada celda tomando en consideración los vecinos definidos en el punto anterior y permitiendo asignar IDs dentro del dominio completo del 0 al 503. Se estableció como restricción forzar que todas las celdas de un mismo *Site* obtuvieran el mismo SSS ID para facilitar la búsqueda a los terminales.

#### IV.3.5 Estudios de cobertura por calidad de señal

El capítulo V de este trabajo contiene la descripción, resultados y análisis de todos los estudios de cobertura por calidad de señal realizados sobre la red LTE así como las simulaciones llevadas a cabo para calcular las cargas de tráfico de cada una de las predicciones.



### CAPÍTULO V

### SIMULACIONES, RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran todos los estudios realizados sobre la red LTE en ATOLL con el objetivo de analizar el impacto de las diferentes estrategias de *Packet Scheduling*.

# V.1 Comparación de las estrategias de Packet Scheduling sin simulaciones ni optimización de la red

Las predicciones realizadas en este punto se hicieron con el objetivo de comparar las distintas estrategias de *Packet Scheduling* mediante predicciones del tipo *Coverage by Throughput DL* y *UL* sin tomar en cuenta la optimización de la red, es decir, las predicciones se realizaron sin la asignación de vecinos, sin *Physical Cell IDs* y sin planificación de frecuencias (todos los transmisores utilizaron el canal 0 de la banda definida). Además, las condiciones de carga (*Load Conditions*) empleadas para los cálculos de las predicciones fueron tomadas directamente del *Cells Table*, es decir, no se realizaron simulaciones previas a las predicciones y por lo tanto no se tomaron en cuenta los mapas de tráfico ni las densidades definidas para cada entorno.

Se realizaron 5 grupos de predicciones en este apartado. Cada grupo consta de 8 predicciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling* en el *downlink* y en el *uplink* respectivamente) que tienen definidos los mismos valores en los parámetros del *Cells Table* (excepto la técnica de *Packet Scheduling* en cada caso).

Los parámetros comunes a todas las predicciones de los 5 grupos son los siguientes:

- Resolution: 20 m

Load conditions: Cells Table

- Terminal: MIMO terminal, Service: Web browsing, Mobility: Pedestrian

- Layer: Best
- Shadowing taken into account: Cell edge coverage probability 85 %
- Display Field: Effective RLC Cell Capacity (kbps)

La Tabla 5.1 muestra los valores que fueron modificados dentro del *Cells Table* para cada grupo de predicciones. El resto de valores de las celdas se mantuvieron según la plantilla LTE creada en el proceso de planificación de la red LTE.

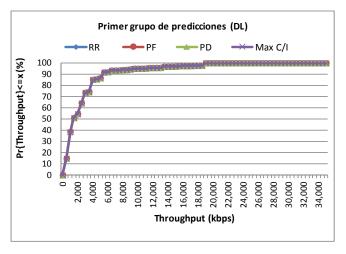
Parámetros de celdas	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Max Traffic Load DL	100 %	50 %	100 %	100 %	100 %
Max Traffic Load UL	100 %	50 %	100 %	100 %	100 %
Traffic Load DL	100 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Traffic Load UL	100 %	50 %	50 %	50 %	50 %
UL Noise Rise	6 dB	6 dB	6 dB	3 dB	3 dB
Max UL Noise Rise	6 dB				
Number of Users DL	1	1	1	1	10
Number of Users UL	1	1	1	1	10
Max Number of Users	-	-	-	-	20
Diversity Support DL	-	-	-	-	-
Diversity Support UL	None	None	None	None	None

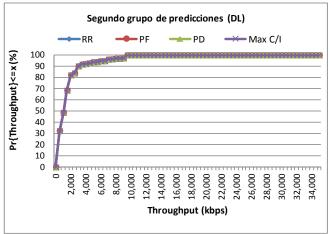
**Tabla 5.1:** *Parámetros de las celdas para los grupos de predicciones del apartado V.1.* 

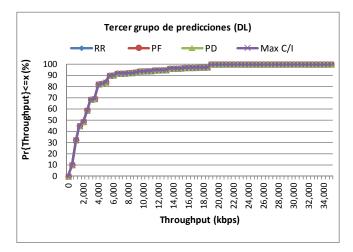
Una vez realizadas las 40 predicciones se observaron las coberturas ilustradas por ATOLL en el mapa de Barcelona, sin embargo, como se hacía muy difícil establecer una comparación visual entre las distintas estrategias de *Packet Scheduling*, se graficaron las curvas de función de distribución acumulativa inversas en porcentaje (*Inverse CDF*) para comparar los resultados.

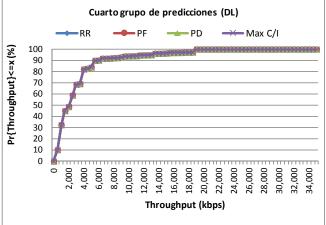
Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran las curvas *Inverse CDF* de los resultados de las predicciones en el DL y UL respectivamente. Dentro de los primeros cuatro grupos de predicciones los resultados son exactamente iguales para las cuatro estrategias de *Packet Scheduling*. Este comportamiento se debe a que las predicciones

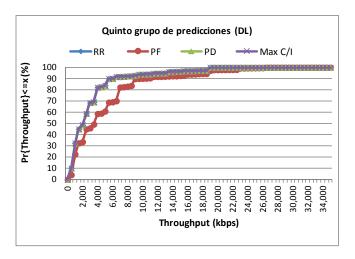
se basan en los valores de *Traffic Load DL* y *UL Noise Rise* para realizar los cálculos de cobertura en el DL y en el UL respectivamente, independientemente del *scheduler* seleccionado en el *Cells Table*, y en este caso dichos valores se han establecido iguales para las diferentes estrategias de *Packet Scheduling* dentro de cada grupo de predicciones. Por otro lado, si las predicciones tomaran los valores de *Traffic Load DL y UL Noise Rise* de resultados de simulaciones previas, el *scheduler* sería tomado en cuenta en los cálculos de la asignación de recursos y los resultados de *Traffic Load DL y UL Noise Rise* obtenidos en las simulaciones dependerían de cada *scheduler*. Por lo tanto, para observar el impacto de las estrategias de *Packet Scheduling* en las predicciones que proporciona ATOLL es necesario realizar previamente simulaciones Monte Carlo. Cabe destacar que en el quinto grupo de predicciones, PF obtiene mejores resultados debido a que el *Channel Throughput* es incrementado por la ganancia de diversidad multiusuario ya que es el único caso donde hay más de un usuario.



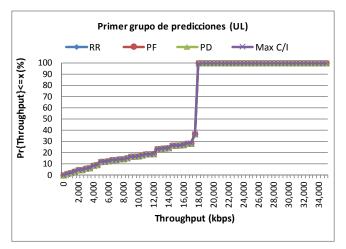


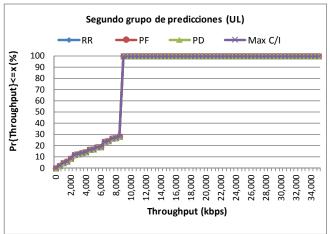


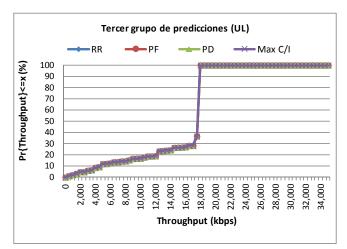


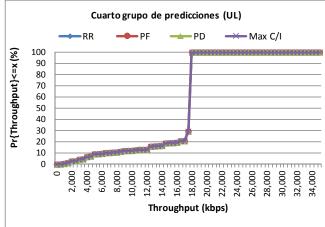


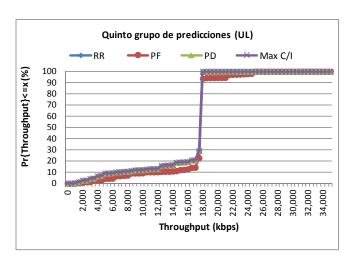
**Figura 5.1:** Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage by Throughput DL.











**Figura 5.2:** Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage by Throughput UL.

Al realizar una comparación de la misma estrategia de *Packet Scheduling* entre los distintos grupos de predicciones, tal y como se muestra en la Figura 5.3 para el caso de RR en el DL, se observa que los peores resultados en cuanto a capacidad de la red se presentan con las condiciones del segundo grupo de predicciones, lo cual es lógico porque las celdas tienen la mitad de los recursos que en los otros casos y están cargadas a su máximo. El siguiente caso, siguiendo el orden de peor a mejor rendimiento, se consigue con las condiciones del primer grupo de predicciones, en donde las celdas pueden utilizar el 100% de los recursos disponibles y están cargadas al máximo. Por último, con las condiciones del tercer, cuarto y quinto grupo los resultados son exactos, esto se debe a que en los tres casos las cargas de tráfico en el DL (*Max Traffic Load DL* y *Traffic Load DL*) son iguales, siendo las únicas diferencias el *UL Noise Rise* y el número de usuarios, lo que confirma que las predicciones en el DL no dependen del *UL Noise Rise* y que RR no se beneficia por la diversidad multiusuario porque no toma en cuenta las condiciones del canal.

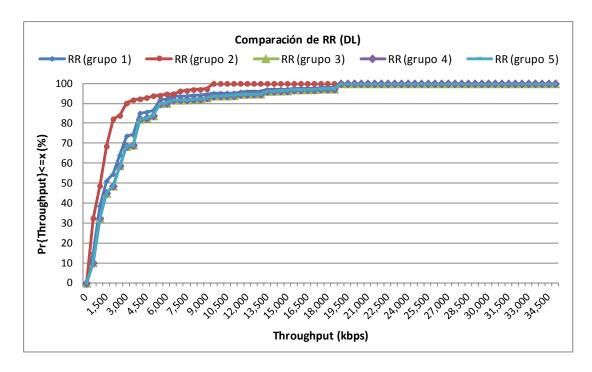


Figura 5.3: Comparación de la estrategia RR entre los cuatro grupos de predicciones en el DL.

En la Figura 5.4 se muestra la comparación de la estrategia RR entre los distintos grupos de predicciones en el UL. Para este enlace se observa que, al igual que en el DL, el peor rendimiento de la red se obtiene con las condiciones del segundo grupo de predicciones. Seguidamente los resultados del primer y tercer grupo de predicciones son iguales ya que el Max Traffic Load UL y el UL Noise Rise es igual en ambos casos y por último, el mejor rendimiento se obtiene con las condiciones del cuarto y quinto grupo donde se ha reducido el UL Noise Rise. Se observa que en general el UL alcanza mayores throughputs con respecto al DL. Esto se debe a que en el UL las predicciones se rigen por el UL Noise Rise y no por el UL Traffic Load. Se puede concluir entonces que para las condiciones de la red planteada, donde no se toma en cuenta el número de usuarios, un UL Noise Rise de 3 dB permite alcanzar mayores throughputs con respecto a uno de 6 dB, puesto que limita la interferencia máxima de cada celda a dicho valor, con lo cual la cobertura se hace mayor. Se observa además que el Max Traffic Load UL sí afecta los cálculos de cobertura en el UL ya que el segundo caso de predicciones es peor que el tercero siendo este parámetro el único que ha cambiado.

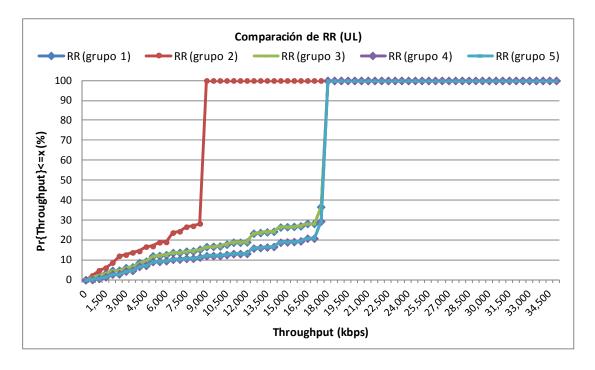


Figura 5.4: Comparación de la estrategia RR entre los cuatro grupos de predicciones en el UL.

Por último es importante mencionar que en ATOLL la única estrategia que obtiene ganancias por diversidad multiusuario es PF, a pesar de que la estrategia Max C/I también es *channel-aware* (porque actúa según los niveles de calidad de señal de cada usuario), y en su defecto, debería beneficiarse por la diversidad multiusuario.

#### V.2 Comparación de la capacidad antes y después de optimizar

Las predicciones realizadas en este apartado se hicieron con el objetivo de comparar el rendimiento de la red antes y después del proceso de optimización. Para ello se tomaron los resultados de las predicciones de *Coverage by Throughput DL* y *UL* realizadas en el apartado V.1 y se compararon con nuevas predicciones que sí toman en cuenta la asignación de vecinos, la asignación de *Physical Cell IDs* y la planificación de frecuencias. En concreto, se estudió la capacidad de la red bajo tres situaciones diferentes: utilizando un canal de 5 MHz común a todos los transmisores, utilizando tres canales de 5 MHz y utilizando un canal de 15 MHz común a todos los transmisores.

#### V.2.1 Comparación usando un canal de 5 MHz vs. tres canales de 5 MHz

Como se ha concluido previamente que es indiferente el tipo de *scheduler* seleccionado en la tabla de celdas para realizar predicciones que no tienen en cuenta resultados de simulaciones Monte Carlo (es decir, predicciones que tienen el *Load Conditions* establecido en *Cells Table*), en este punto solo se realizó el estudio con la estrategia RR. En este sentido, se realizaron 8 nuevas predicciones (4 en el DL y 4 en el UL) con los mismos parámetros definidos para los grupos de predicciones 1, 2, 3 y 4 del apartado V.1 mostrados en la Tabla 5.1 pero tomando en cuenta la optimización de la red, es decir, empleando planificación frecuencial con 3 canales de 5 MHz. Cabe recordar que el grupo 5 tiene las mismas condiciones que el grupo 4, excepto la cantidad de usuarios que es un parámetro que no afecta los resultados para RR por lo que los resultados serían iguales que para el grupo 4.

Los parámetros comunes a las 8 predicciones realizadas en este apartado son los mismos que para las predicciones del apartado V.1.

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran las curvas *Inverse CDF* de los resultados de las predicciones en el DL y UL respectivamente. En el caso del DL se observa que la capacidad de la red se incrementa en el caso optimizado con respecto al caso no optimizado, lo cual es lógico porque con Frequency Planning se reducen las interferencias puesto que las estaciones base vecinas ya no utilizan las mismas frecuencias. Sin embargo, en el caso del UL se observa que la capacidad de la red es igual tanto para el caso optimizado como no optimizado. Este comportamiento se debe a que ATOLL calcula las interferencias cuando realiza predicciones de tipo Coverage by Throughput DL, mientras que cuando realiza predicciones de tipo Coverage by Throughput UL no calcula las interferencias sino que se rige únicamente por los valores de UL Noise Rise ya establecidos, y como en este caso se mantuvo constante dicho valor entre cada pareja de predicciones sin y con Frequency Planning entonces los resultados en el UL son exactos. Cabe destacar que si se realizan simulaciones Monte Carlo previo a realizar las predicciones en el UL sí se observa la mejora del throughput con Frequency Planning ya que durante las simulaciones se calcula el UL Noise Rise dependiendo de las interferencias de la red.

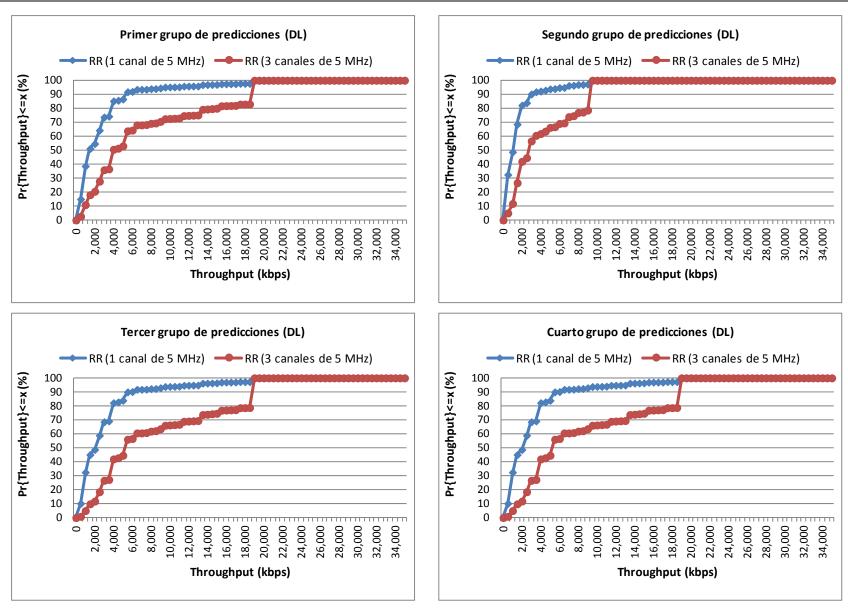
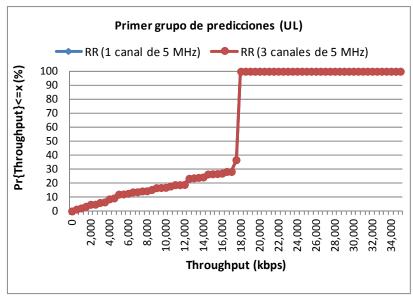
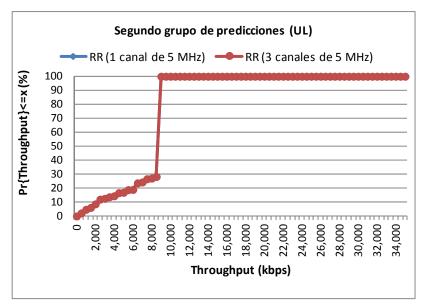
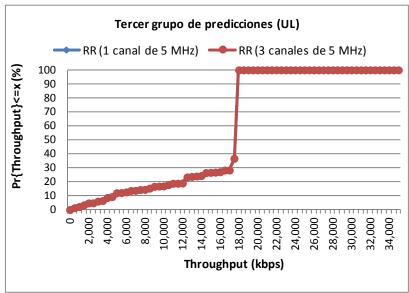


Figura 5.5: Comparación de la capacidad de la red sin optimización y con optimización en el DL.







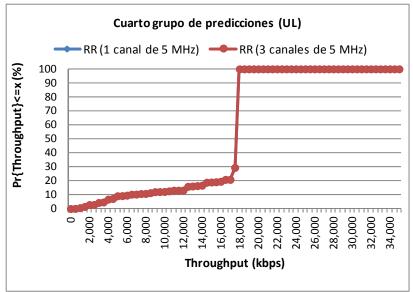
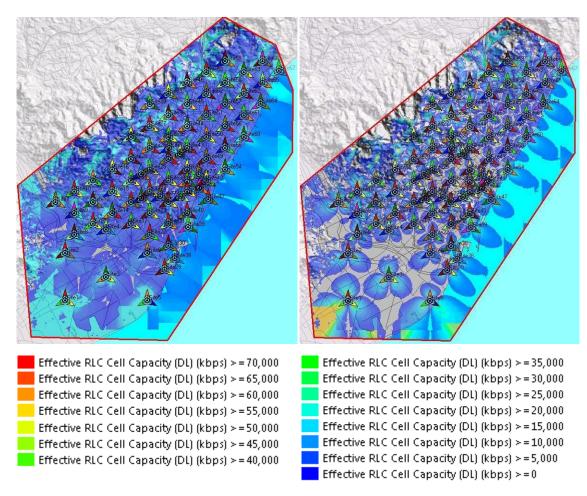


Figura 5.6: Comparación de la capacidad de la red sin optimización y con optimización en el UL.

#### V.2.2 Comparación usando tres canales de 5 MHz vs. un canal de 15 MHz

Posteriormente se quiso comprobar la diferencia en cuanto a capacidad de la red entre utilizar *Frequency Planning* con 3 canales de 5 MHz y utilizar un mismo canal de 15 MHz en todas las celdas. Para ello se realizaron 8 nuevas predicciones (4 en el DL y 4 en el UL) con los mismos parámetros definidos para los grupos de predicciones 1, 2, 3 y 4 del apartado V.1 mostrados en la Tabla 5.1 pero utilizando la banda 2110 FDD – 15 MHz (E-UTRAN Band 1).

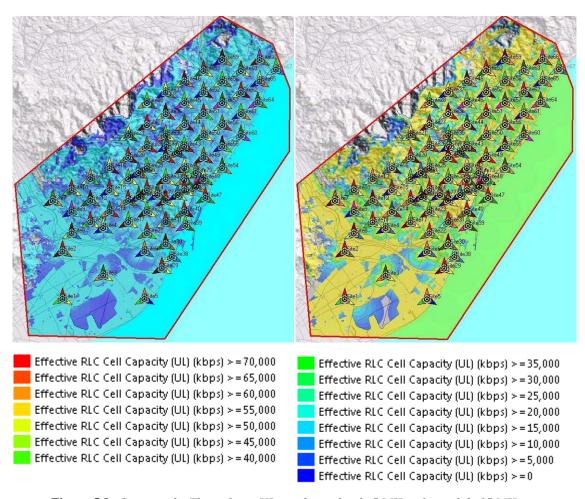
Las Figuras 5.7 y 5.8 muestran los resultados de las predicciones *Coverage by Throughput* correspondientes a las condiciones del primer grupo de predicciones en el DL y en el UL respectivamente (cabe destacar que el comportamiento es similar en los otros tres grupos de predicciones por lo que solo se ha ilustrado el primero). En ambos casos se observa que al emplear *Frequency Planning* con 3 canales de 5 MHz se obtiene un área de cobertura más extensa con respecto al caso de utilizar un solo canal de 15 MHz, pero en contraparte las capacidades son menores en el primer caso.



**Figura 5.7:** Coverage by Throughput DL con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz respectivamente.

Se observa que en el UL las diferencias en cuanto a capacidades son más apreciables que en el DL, esto se debe a que las predicciones en el UL no calculan las interferencias, tal y como se ha mencionado previamente, por lo que se está comparando una red cuyas celdas en un caso tienen el triple de recursos que en el otro y las interferencias son las mismas (porque el *UL Noise Rise* se mantiene constante) por ello las mejoras en el caso de usar un canal de 15 MHz son más que evidentes pero no reflejan la realidad. No obstante, se observa un pequeña reducción del área de cobertura al emplear un canal de 15 MHz, lo que indica que el ruido sí es calculado en las predicciones, pues de no ser así el área cubierta sería exactamente igual y únicamente cambiarían las capacidades de la red, es decir, en cada píxel del mapa el

valor del ruido más interferencia (I+N) será distinto entre un caso y el otro porque el ruido (N) cambia, siendo peor en el caso de la red que usa la canalización de 15 MHz porque el ancho de banda es mayor.



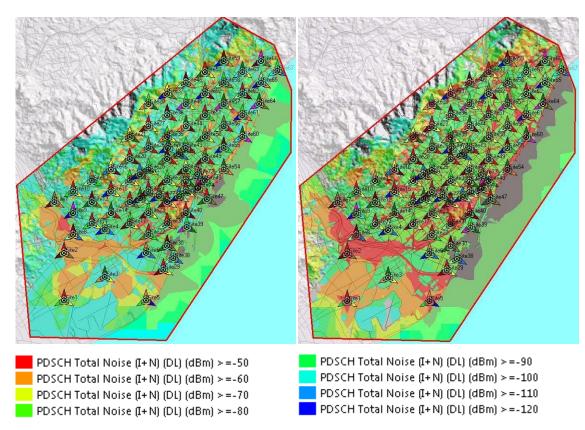
**Figura 5.8:** Coverage by Throughput UL con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz respectivamente.

En el caso del DL, donde sí se calculan las interferencias, se puede observar que las mejoras de capacidad al usar un canal de 15 MHz son leves en comparación al caso de utilizar 3 canales de 5 MHz, es decir, son pocas las zonas (alrededor de un 10% del área cubierta) que se ven favorecidas con *throughputs* mayores al máximo alcanzado con 3 canales de 5 MHz (que corresponde aproximadamente a 18,000 kbps) y el resto de las zonas tienen *throughputs* similares. En este enlace se observa que la reducción del área de cobertura es mucho más drástica que en el caso del UL,

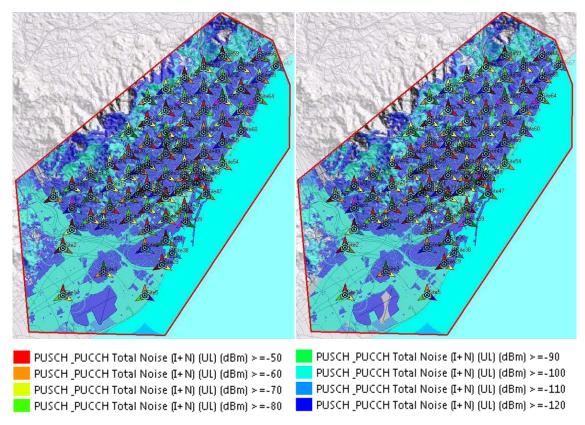
porque en este caso no solo se toma en cuenta el ruido sino también las interferencias, con lo cual el valor del ruido más interferencia (I+N) en el caso de usar un canal de 15 MHz es mucho peor que en el caso de usar 3 canales de 5 MHz porque tanto las interferencias (I) como el ruido (N) son peores.

Por lo antes comentado, se puede decir que para la red LTE en cuestión y bajo las condiciones que se han planteado en las predicciones del grupo 1 (p. ej. celdas cargadas al 100%), se concluye que en caso de disponer un ancho de banda de 15 MHz, es mejor emplearlo con 3 canales de 5 MHz que con un solo canal de 15 MHz común a todas las celdas porque la cobertura se ve limitada por las interferencias. Sin embargo, bajo otras condiciones (p. ej. si las celdas no están cargadas al 100%) donde las interferencias no sean un factor tan desfavorecedor, emplear un solo canal de 15 MHz permitiría alcanzar *throughputs* mucho más elevados que al usar 3 canales de 5 MHz en áreas de cobertura similares.

En las Figuras 5.9 y 5.10 se ilustran los resultados de realizar predicciones de *Coverage by C/(I+N)* con un *Display* establecido en "*PDSCH Total Noise (I+N)*" para el caso del DL y "*PUSCH & PUCCH Total Noise (I+N)*" para el caso del UL respectivamente. En dichas figuras se puede apreciar cómo la diferencia de ruido total en el DL varía entre el caso de utilizar 3 canales de 5 MHz o 1 canal de 15 MHz mientras que en el UL son pocas las diferencias entre un caso y el otro.

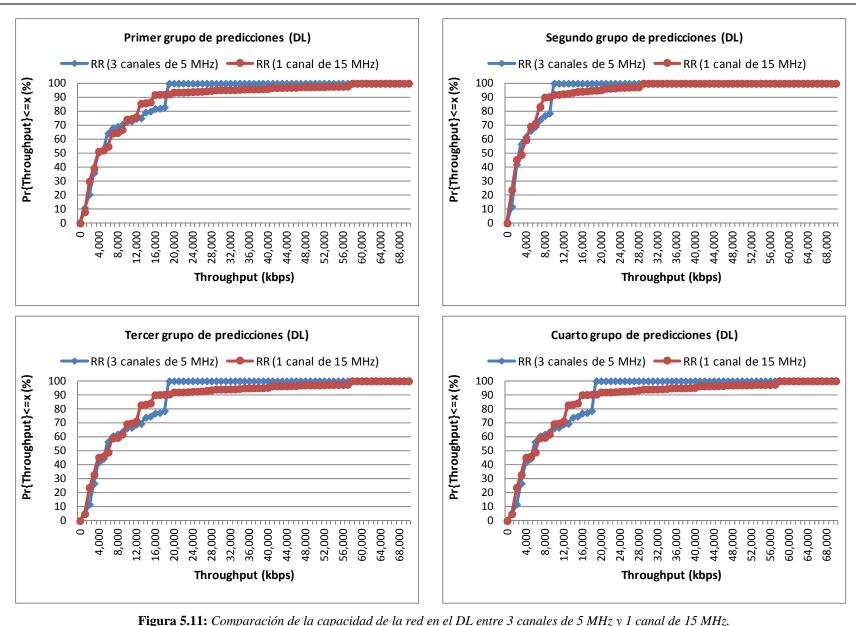


**Figura 5.9:** *PDSCH Total Noise (I+N) con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz respectivamente.* 



**Figura 5.10:** PUDSCH & PUCCH Total Noise (I+N) con 3 canales de 5 MHz y 1 canal de 15 MHz respectivamente.

Para concluir con la comparación se muestran las curvas *Inverse CDF* de los resultados de las predicciones de *Coverage by Throughput DL* y *UL* en las Figuras 5.11 y 5.12 respectivamente. En el caso del DL se observa que bajo las condiciones de los cuatro grupos de predicciones se cumple que la capacidad de la red es muy similar entre el caso de utilizar *Frequency Planning* con 3 canales de 5 MHz o utilizar un solo canal de 15 MHz en todas las celdas. Sin embargo se puede apreciar que al utilizar un canal de 15 MHz el *throughput* máximo alcanzable por las celdas es mayor que en el caso de los 3 canales de 5 MHz aunque solo un 10% del área, tal y como se ha mencionado previamente. En el caso del UL se observa que la capacidad de la red es mucho mejor utilizando un solo canal de 15 MHz, pero tal y como se ha discutido previamente, los resultados no son realistas pues en ATOLL no toman en cuenta el hecho de que con un solo canal de 15 MHz las interferencias son mayores que usando 3 canales de 5 MHz.



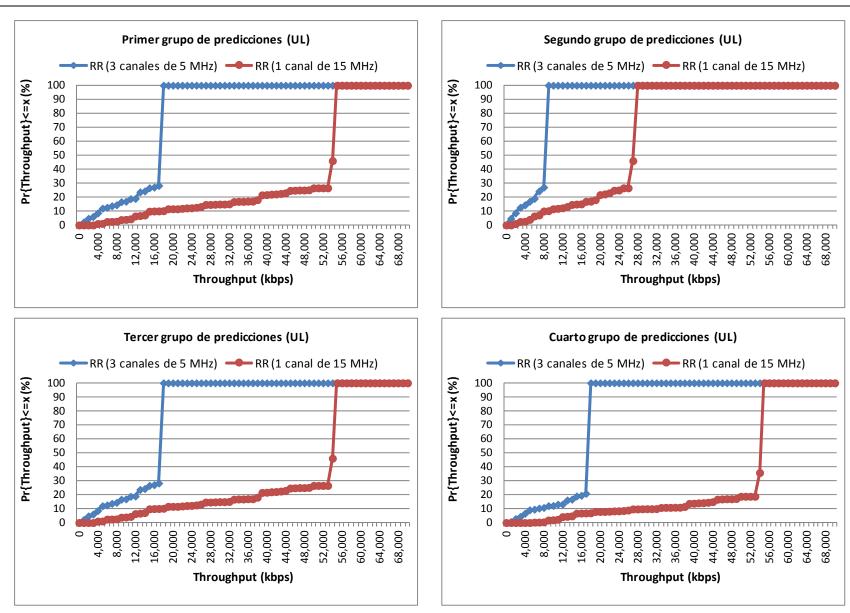


Figura 5.12: Comparación de la capacidad de la red en el UL entre 3 canales de 5 MHz, y 1 canal de 15 MHz.

# V.3 Comparación de las estrategias de Packet Scheduling con simulaciones

Las predicciones realizadas en este punto se hicieron con el objetivo de comparar las distintas estrategias de *Packet Scheduling* mediante predicciones del tipo *Coverage by Throughput DL* y *UL* tomando en cuenta la asignación de vecinos y la asignación de los *Physical Cell IDs* pero sin planificación de frecuencias (todos los transmisores utilizaron el canal 0 de la banda definida de 5 MHz). Las condiciones de carga (*Load Conditions*) empleadas para los cálculos de las predicciones fueron tomadas de los resultados de simulaciones que se realizaron previamente, de manera que en este caso sí se tomaron en cuenta los mapas de tráfico, las densidades definidas para cada entorno, los perfiles de usuarios y todos los parámetros de la red establecidos en la planificación de la red LTE.

#### V.3.1 Primer grupo de predicciones con simulaciones

Se realizaron 4 simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*) con los siguientes parámetros:

Propiedades de los schedulers:

- Target Throughput for Voice Services: Effective RLC Throughput
- Target Throughput for Data Services: Effective RLC Throughput
- Bearer Selection Criterion: Bearer Index
- Uplink Bandwidth Allocation Target: Best Bearer

Propiedades de las simulaciones:

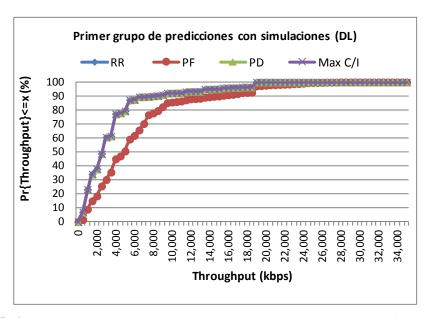
- Max Traffic Load DL: 100 %
- Max Traffic Load UL: 100 %
- *Max UL Noise Rise*= 6 dB (definido en el *Cells Table*)

- Generator initialisation: 1 (para generar la misma distribución de usuarios en cada simulación)
- Number of simulations: 1
- Global Scaling Factor: 1

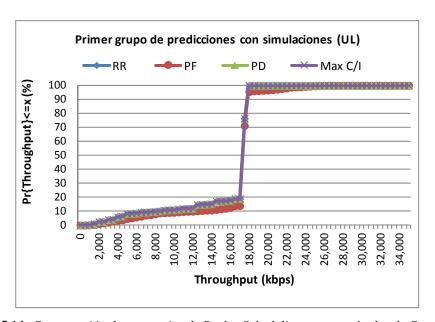
Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones se realizaron 8 predicciones del tipo *Coverage by Throughput* (una para cada estrategia de *Packet Scheduling* en el DL y en el UL respectivamente) con las siguientes propiedades:

- Resolution: 20 m
- Load Conditions: (según cada caso se seleccionó una de las 4 simulaciones realizadas previamente)
- Terminal: MIMO terminal, Service: Web browsing, Mobility: Pedestrian
- Layer: Best
- Shadowing taken into account: Cell edge coverage probability 85 %
- Display Field: Effective RLC Cell Capacity (kbps)

En las Figuras 5.13 y 5.14 se muestran los resultados de las curvas *Inverse CDF* para las predicciones en el DL y en UL respectivamente. Se observa que las estrategias RR, PD y Max C/I obtienen los mismos resultados en ambos enlaces y la única estrategia que posee un comportamiento diferente es PF, siendo mejor que las otras tres.



**Figura 5.13:** Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage by Throughput DL.



**Figura 5.14:** Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage by Throughput UL.

Las Figuras 5.15 y 5.16 ilustran los resultados de cobertura por *throughput* correspondientes a las estrategias RR y PF en el DL y el UL respectivamente. Las coberturas correspondientes a las estrategias PD y Max C/I son idénticas a las de la estrategia RR, tal y como se ha comentado previamente. Se observa en cada caso que

el UL obtiene mejores *throughputs* con respecto al DL y que PF cubre más área que RR.

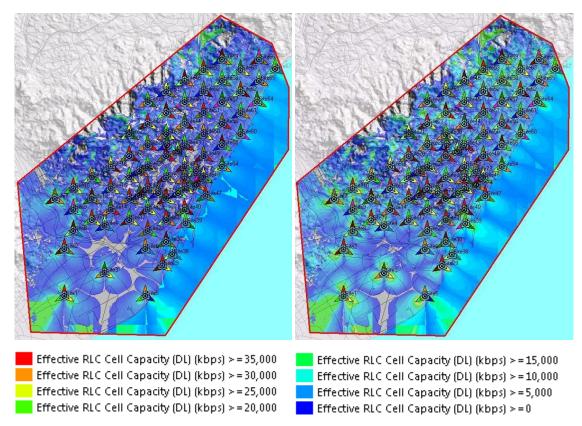
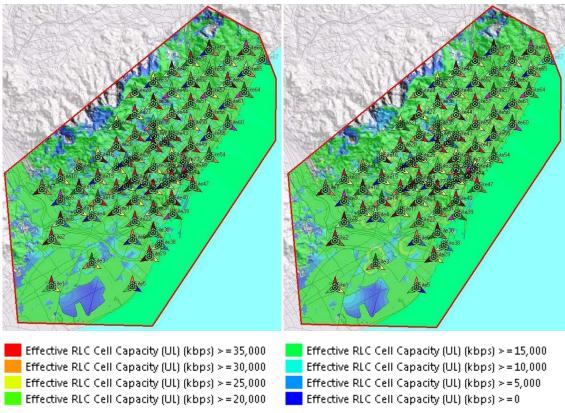


Figura 5.15: Coverage by Throughput DL para RR (izquierda) y PF (derecha).



**Figura 5.16:** Coverage by Throughput UL para RR (izquierda) y PF (derecha).

En vista de que los resultados de las predicciones son exactos para RR, PD y Max C/I, se decidió analizar en detalle los resultados de las simulaciones. La Tabla 5.2 contiene la cantidad de usuarios y throughputs máximos y mínimos demandados por la red LTE en ambos enlaces y la Tabla 5.3 contiene las estadísticas de las cuatro simulaciones. Se puede observar que las cuatro estrategias obtienen el mismo número de usuarios porque las simulaciones se realizaron con la misma semilla para poder establecer comparaciones bajo las mismas condiciones, es decir, en las cuatro simulaciones los usuarios se encuentran en las mismas coordenadas, con las mismas condiciones de canal y solicitan el mismo servicio en cada caso.

	Demand
Total Users	3,507
Active DL	1,906
Active UL	897
Active DL + UL	488
Inactive	216
Max Throughput Demand (DL)	480.26 Mbps
Min Throughput Demand (DL)	111.44 Mbps
Max Throughput Demand (UL)	95.33 Mbps
Min Throughput Demand (UL)	28.43 Mbps

**Tabla 5.2:** Demandas de las simulaciones del apartado V.3.1.

	RR	PF	PD	Max C/I
Active Users	3,217	3,217	3,217	3,217
Active DL	1,863	1,863	1,863	1,863
Active UL	877	877	877	877
Active DL + UL	477	477	477	477
Inactive	216	216	216	216
No Coverage	69	69	69	69
No Service	5	5	5	5
Sheduler saturation	0	0	0	0
Resource Saturation	0	0	0	0
Effective RLC Aggregate	403.25 Mbps	456.96 Mbps	385.72 Mbps	414.44 Mbps
Throughput (DL)				
Effective RLC Aggregate Throughput (UL)	92.63 Mbps	92.66 Mbps	92.63 Mbps	92.63 Mbps

**Tabla 5.3:** Estadísticas de las simulaciones del apartado V.3.1.

Es importante destacar que a pesar de que las predicciones resultaron iguales para RR, PD y Max C/I, los resultados de las simulaciones muestran que el *Effective RLC Aggregate Throughput (DL)* en cada caso es diferente. En este sentido, el mejor *Effective RLC Aggregate Throughput (DL)* se consigue con la estrategia PF, seguido de la estrategia Max C/I, posteriormente RR y por último PD, no obstante, todas las estrategias se acercan al máximo *throughput* demandado por la red en ambos enlaces.

Además, para las cuatro simulaciones existe el mismo número de usuarios activos y rechazados, y éstos últimos son rechazados bajo las mismas causas pero ninguno de ellos debido a "Resource Saturation", es decir que todos los usuarios

simulados consiguen al menos el *Min Throughput* demandado. Revisando los datos por celdas se obtiene que en el caso de RR, PD y Max C/I en el DL, el 82.5% (188) de las celdas tienen un *Traffic Load* por debajo del 100%, lo que quiere decir que el *Aggregate Throughput* de dichas celdas es exactamente igual independientemente de la estrategia de *scheduling* utilizada porque en todos los casos es posible satisfacer las demandas de *Max Throughput* de los usuarios sin que se agoten los recursos de la celda, alcanzando de esa manera el *Max Throughput Demand*. Por otro lado, el 17.5% (40) de las celdas están cargadas al 100%, y es solo en estos casos donde se puede apreciar las diferencias entre cada *scheduler*, ya que al ser los recursos limitados para el número de usuarios y sus demandas, la forma en que estos recursos son asignados según cada estrategia se refleja en la obtención de distintos *Aggregate Throughputs* en cada caso.

Con respecto a PF solo el 2.6% (6) de las celdas tienen un *Traffic Load* del 100%, con lo cual se logra conseguir un *Aggregate Throughput* igual al *Max Throughput Demand* en el 97.4% de las celdas. La razón por la cual los *Traffic Loads* resultan iguales para las estrategias RR, PD y Max C/I y difieran de PF se debe a que en los tres primeros casos, según las fórmulas empleadas por ATOLL, los usuarios solicitan la misma cantidad de recursos para satisfacer una demanda de *throughput* cualquiera, mientras que en el caso de PF los recursos solicitados para satisfacer la misma demanda de *throughput* son menores porque el *Channel Throughput* que observan los usuarios se ve incrementado por la ganancia de diversidad multiusuario con respecto a las demás estrategias. De allí que las predicciones reflejen los mismos resultados para RR, PD y Max C/I, mientras que PF se muestra como la mejor estrategia.

Por otro lado, en el UL se consigue que la totalidad de las celdas tengan un *Traffic Load* por debajo del 20% para las cuatro estrategias, motivo por el cual no se puede establecer una comparación entre las estrategias de *Packet Scheduling* en este enlace. En definitiva, bajo las condiciones que se ha definido la red (p. ej. Figuras de ruido, ganancias de las antenas, demandas de *throughput* de los servicios, volumen de

bits por sesión de los servicios, etc.), la cobertura y la capacidad del sistema se encuentran limitadas por el enlace descendente.

Cabe mencionar que el hecho de que ningún usuario es rechazado debido a "Scheduler Saturation" se debe a que no se fijó ningún límite de Max Number of Users en la tabla de celdas, con lo cual en cada simulación el scheduler en cuestión selecciona a todos los usuarios generados en las simulaciones Monte Carlo para realizar la repartición de los recursos.

#### V.3.2 Segundo grupo de predicciones con simulaciones

Como se ha visto en el caso discutido anteriormente que la red disponía de suficientes recursos para satisfacer las demandas de los usuarios, y como consecuencia los *Aggregate Throughputs* conseguidos por las cuatro estrategias eran casi iguales a las demandas máximas, se decidió aumentar la densidad de usuarios por un factor de 4 para conseguir que la mayor cantidad de celdas de la red estuvieran cargadas al 100% y poder apreciar mejor el impacto de cada estrategia de *Packet Scheduling*. Para ello se estableció el parámetro "*Global Scaling Factor*" de las simulaciones a 4, que equivale a multiplicar las densidades de cada *Environment* por dicho factor.

En este sentido, se realizaron 4 simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*) con los siguientes parámetros:

Propiedades de los schedulers:

- Target Throughput for Voice Services: Effective RLC Throughput
- Target Throughput for Data Services: Effective RLC Throughput
- Bearer Selection Criterion: Bearer Index
- Uplink Bandwidth Allocation Target: Best Bearer

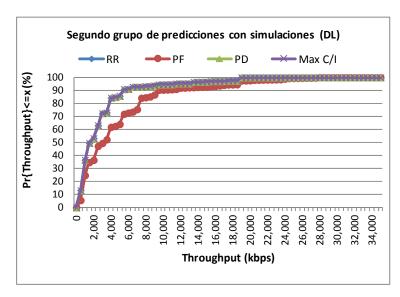
#### Propiedades de las simulaciones:

- Max Traffic Load DL: 100 %
- Max Traffic Load UL: 100 %
- Max UL Noise Rise= 6 dB
- Generator initialisation: 1
- Number of simulations: 1
- Global Scaling Factor: 4

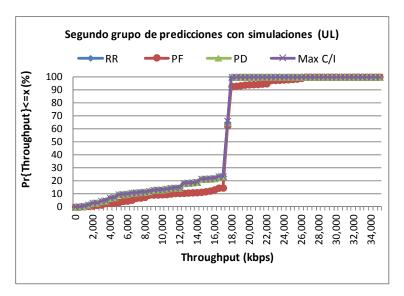
Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones se realizaron 8 predicciones del tipo *Coverage by Throughput* (una para cada estrategia de *Packet Scheduling* en el DL y en el UL respectivamente) con las siguientes propiedades:

- Resolution: 20 m
- Load Conditions: (según cada caso se seleccionó una de las 4 simulaciones realizadas previamente)
- Terminal: MIMO terminal, Service: Web browsing, Mobility: Pedestrian
- Layer: Best
- Shadowing taken into account: Cell edge coverage probability 85 %
- Display Field: Effective RLC Cell Capacity (kbps)

En las Figuras 5.17 y 5.18 se muestran los resultados de las curvas *Inverse CDF* para las predicciones en el DL y en UL respectivamente. Al igual que en el primer grupo de predicciones con simulaciones (apartado V.3.1), se observa que las estrategias RR, PD y Max C/I obtienen los mismos resultados en ambos enlaces y la única estrategia que posee un comportamiento diferente es PF, siendo mejor que las otras tres.



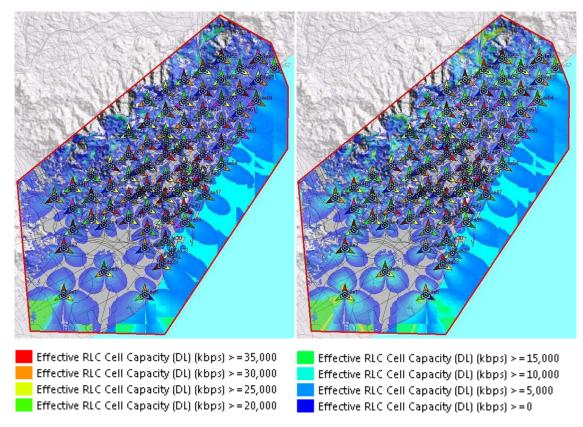
**Figura 5.17:** Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage by Throughput DL (aumentando la densidad de usuarios).



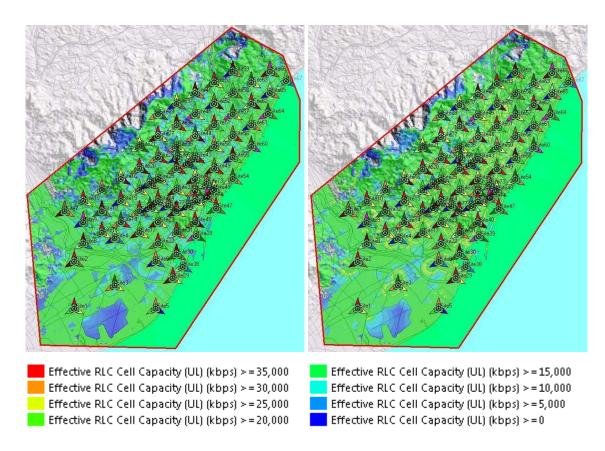
**Figura 5.18:** Comparación de estrategias de Packet Scheduling para resultados de Coverage by Throughput UL (aumentando la densidad de usuarios).

Las Figuras 5.19 y 5.20 ilustran los resultados de cobertura por *throughput* correspondientes a las estrategias RR y PF en el DL y el UL respectivamente. Las coberturas correspondientes a las estrategias PD y Max C/I son idénticas a las de la estrategia RR. Visualmente se observa que tanto para RR como para PF el área de cobertura se reduce en comparación a las coberturas de las Figuras 5.15 y 5.16 porque

se ha aumentado la densidad de usuarios y en consecuencia el *Traffic Load* de las celdas, ocasionando mayores interferencias. Se observa nuevamente que PF cubre más area que las otras estrategias y que el enlace ascendente obtiene mayor área de cobertura y mayores *throughputs* respecto al enlace descendente.



**Figura 5.19:** Coverage by Throughput DL para RR (izquierda) y PF (derecha) (aumentando la densidad de usuarios).



**Figura 5.20:** Coverage by Throughput UL para RR y PF respectivamente (aumentando la densidad de usuarios).

La Tabla 5.4 contiene la cantidad de usuarios y *throughputs* máximos y mínimos demandados por la red LTE en ambos enlaces y la Tabla 5.5 contiene las estadísticas de las cuatro simulaciones.

	Demand
Users	14,005
Active DL	7,705
Active UL	3,462
Active DL + UL	1,985
Inactive	853
Max Throughput Demand (DL)	1,905.93 Mbps
Min Throughput Demand (DL)	448.3 Mbps
Max Throughput Demand (UL)	376.26 Mbps
Min Throughput Demand (UL)	111.79 Mbps

**Tabla 5.4:** Demandas de las simulaciones del apartado V.3.2.

	RR	PF	PD	Max C/I
Active Users	11,537	12,653	11,537	12,211
Active DL	6,205	7,311	6,205	6,977
Active UL	3,394	3,398	3,394	3,394
Active DL + UL	1,938	1,944	1,938	1,840
Inactive	853	853	853	853
No Coverage	256	256	256	256
No Service	21	18	21	20
Sheduler saturation	0	0	0	0
Resource Saturation	1,338	225	1,338	665
Effective RLC Aggregate	557.14 Mbps	951.98 Mbps	516.2 Mbps	675.49 Mbps
Throughput (DL)				
Effective RLC Aggregate	367.33 Mbps	369.06 Mbps	367.33 Mbps	364.86 Mbps
Throughput (UL)				

**Tabla 5.5:** *Estadísticas de las simulaciones del apartado V.3.2.* 

Se puede observar que en este caso el número de usuarios activos sí cambia según la estrategia seleccionada, siendo mayor para PF, seguido de Max C/I y por último, con la misma cantidad de usuarios, RR y PD. Además se observa que existe un gran número de usuarios rechazados debido a "Resource Saturation" y que los Aggregate Throughput en el DL son distintos en cada caso pero muy por debajo del Max Aggregate Throughput Demand, de hecho, son solo un poco superior al Min Aggregate Throughput Demand. Al igual que en el primer grupo de predicciones (apartado V.3.1), PF es la estrategia que alcanza el mayor Aggregate Throughput, seguida de Max C/I, RR y por último PD.

La razón por la que RR y PD obtienen la misma cantidad de usuarios activos y rechazados, y éstos últimos bajo las mismas causas, se debe a que en ambos casos el *scheduler* otorga recursos a los usuarios en orden de mayor a menor prioridad de sus servicios. En el caso de PF el *scheduler* también ordena a los usuarios según las prioridades de sus servicios, pero tal y como se ha explicado previamente, los recursos pueden alcanzar para una mayor cantidad de usuarios porque éstos piden menos en comparación a las otras estrategias. Por último, en el caso de Max C/I, el *scheduler* ordena a los usuarios según la relación C/(I+N) que perciben del canal, y como los usuarios con elevados C/(I+N) pueden establecer *Radio Bearers* más altos,

que a su vez requieren menos cantidad de recursos para un mismo servicio respecto a un *Radio Bearer* de menor índice, entonces se aprovechan los recursos de mejor manera y se obtiene una mayor cantidad de usuarios conectados con respecto a RR y PD.

Al realizar el estudio por celdas se observa que para RR, PD y Max C/I el 75.88% de las celdas se encuentran cargadas al 100% mientras que existe un 24.12% de celdas que aún disponen de recursos a pesar de que la densidad se ha aumentado considerablemente. En las celdas que se encuentran cargadas al 100% son muy pocos los usuarios que logran alcanzar la demanda máxima de throughput, algunos logran obtener throughputs intermedios entre sus demandas máximas y mínimas pero la gran mayoría solo logra obtener las demandas mínimas e incluso muchos de ellos son rechazados por "Resource Saturation". Esto indica que la densidad de usuarios establecida ha sido exagerada para las condiciones de la red LTE y se han saturado los recursos en la mayoría de las celdas. Cabe destacar que ATOLL primero satisface las demandas mínimas de throughput de cada usuario y después, si queda remanente de recursos, son repartidos según cada estrategia de *Packet Scheduling*. Por esto, simular una red en donde solo se pueda satisfacer las demandas mínimas de los usuarios no ilustra el impacto de las distintas estrategias de Packet Scheduling pues éstas no llegan a ser implementadas. A pesar de que este no es el caso, porque se ha observado que sí hay diferencias entre los Aggregate Throughput según cada estrategia implementada, las diferencias son pocas porque son pocos los casos donde se pudo satisfacer demandas mayores a las mínimas.

En la Figura 5.21 se muestra nuevamente la cobertura por *throughput* para la estrategia RR en el DL, la misma que en la Figura 5.19 pero en conjunto con los resultados de la simulación sobre la cual se basa dicha predicción. Se puede observar que existen usuarios marcados como activos y conectados en el DL según los resultados de la simulación, que se encuentran en zonas de no cobertura según la predicción, y que además, tienen el servicio *Web Browsing*, el terminal MIMO y la movilidad *Pedestrian* (valores con los cuales se ha realizado la predicción). La razón

de esta incongruencia se debe a que ATOLL calcula el *shadowing* de manera distinta en las simulaciones y en las predicciones, por lo que los resultados finales de *Channel Throughput* que observa cada usuario no coinciden en ambos casos.

Para obtener resultados congruentes entre las simulaciones y las predicciones debe establecerse a 0 dB la desviaciones estándar del modelo y de C/I en las propiedades de las *clutter classes* y además deben realizarse las predicciones sin considerar *shadowing* (en este caso se consideró el *shadowing* para una probabilidad de cobertura en el borde de la celda del 85%). De todas maneras, como se ha observado que las predicciones de *Coverage by Throughput* con *Display "Effective RLC Cell Capacity"* no son apropiadas para analizar el impacto de las distintas estrategias de *Packet Scheduling*, en tanto que solo toman los valores de *Traffic Load DL y UL Noise Rise* de los resultados de las simulaciones sin importar a qué usuarios se les han asignado los recursos, no se realizarán más predicciones de este tipo porque no se puede apreciar la diferencia entre las estrategias RR, PD y Max C/I.

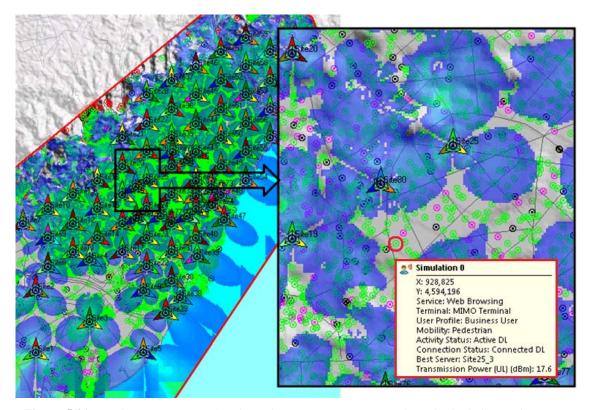


Figura 5.21: Predicción Coverage by Throughput DL para RR junto al resultado de la simulación.

### V.3.3 Tercer grupo de predicciones con simulaciones

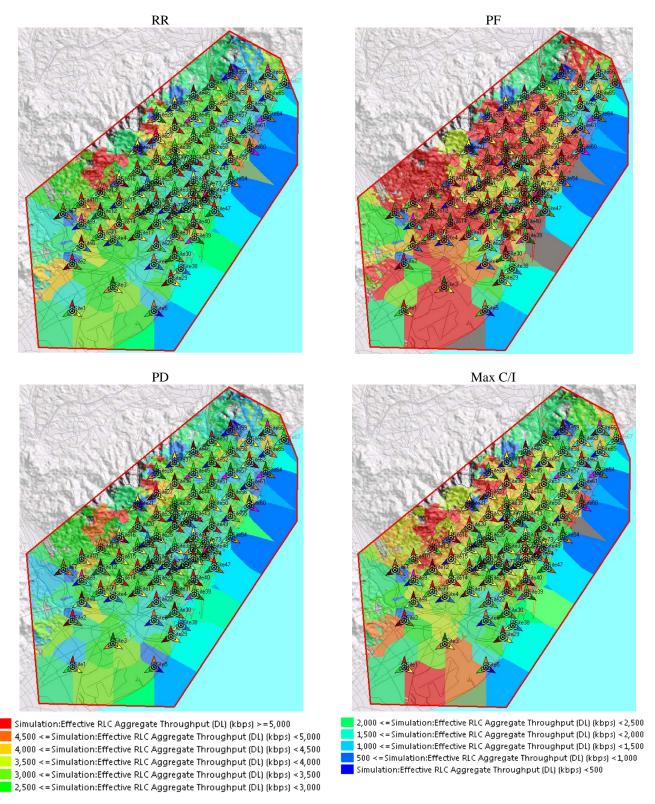
Según lo comentado previamente, se decidió realizar nuevas predicciones modificando el *Display* con el objetivo de apreciar las diferencias en los *Aggregate Throughputs* conseguidos por cada estrategia de *Packet Scheduling*.

En este sentido, se realizaron 8 predicciones del tipo *Coverage by Throughput* (una para cada estrategia de *Packet Scheduling* en el DL y en el UL respectivamente) con las siguientes propiedades:

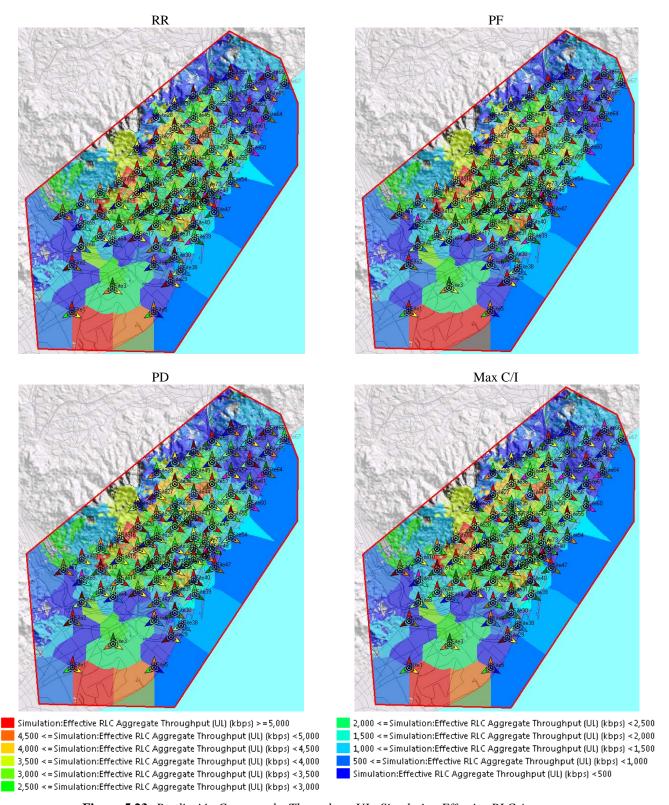
- Resolution: 20 m
- Load conditions: (según cada caso se seleccionó una de las 4 simulaciones realizadas en el apartado V.3.2)
- Terminal: MIMO terminal, Service: Web browsing, Mobility: Pedestrian
- Layer: Best
- Shadowing taken into account: Cell edge coverage probability 85 %
- Display Field: Simulation: Effective RLC Aggregate Throughput (kbps)

En las Figuras 5.22 y 5.23 se ilustran los resultados de las coberturas para las predicciones en el DL y en el UL respectivamente. En el caso del DL se puede apreciar las diferencias en cuanto a los *Aggregate Throughputs* conseguidos por las cuatro estrategias, tal y como se ha comentado en el apartado V.3.2, PF es la que obtiene los mayores *throughputs*, seguida de la estrategia Max C/I, RR y por último PD.

En el caso del UL las diferencias no son tan evidentes como en el DL y la razón de que los *Aggregate Throughputs* en este enlace sean tan parecidos entre las distintas estrategias se debe a que las celdas están cargadas muy por debajo de sus capacidades máximas y en la mayoría de los casos las cuatro estrategias son capaces de satisfacer las demandas máximas de *throughput* de los usuarios, comprobándose lo mostrado en la Tabla 5.5.



**Figura 5.22:** Predicción Coverage by Throughput DL: Simulation Effective RLC Aggregate Throughput.



**Figura 5.23:** Predicción Coverage by Throughput UL: Simulation Effective RLC Aggregate Throughput.

### V.4 Modificación de la configuración de la red LTE

Las simulaciones realizadas en el apartado V.3.2 han mostrado que, a pesar de que las densidades de usuarios eran excesivas y en consecuencia la mayor parte de las celdas estaban cargadas al 100%, algunas de ellas tenían *Traffic Loads* bajos indicando que su presencia en la red no era necesaria. Asimismo, se ha apreciado en los resultados de las simulaciones que existen zonas correspondientes al *Environment Dense Urban* que están desprovistas de estaciones base y en consecuencia los usuarios ubicados en dichas zonas no tienen cobertura. Es por esto que se decidió realizar una modificación en la red LTE desactivando las celdas que están siendo infrautilizadas y agregando nuevos *Sites* en donde es necesario extender la cobertura, con el fin de darle a la red la mayor homogeneidad posible entre las estaciones base que la conforman.

En la Figura 5.24 se muestra la configuración inicial de la red LTE con el mapa de tráfico donde se ilustran los cuatro *Environments* que conforman el mapa de Barcelona. Apoyándose en la información del mapa de tráfico y en los resultados de *Traffic Load DL* arrojados por las simulaciones del apartado V.3.2, se decidió desactivar 40 transmisores y agregar dos nuevos *Sites*. En la Figura 5.25 se ilustra la nueva configuración de la red LTE.

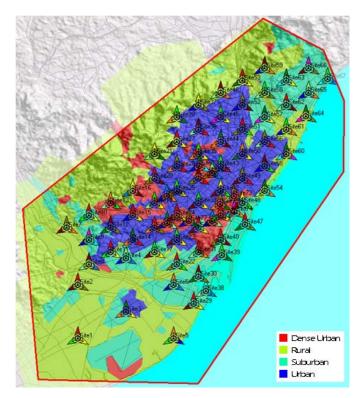


Figura 5.24: Configuración inicial de la red LTE junto al mapa de tráfico.

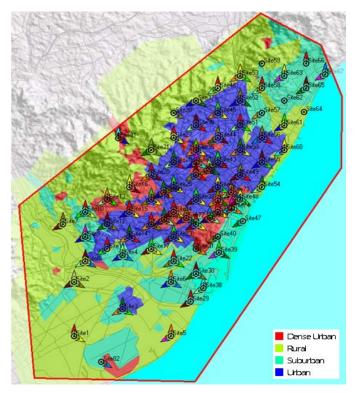


Figura 5.25: Nueva configuración de la red LTE junto al mapa de tráfico.

Se realizó nuevamente la asignación de vecinos y de *Physical Cell IDs* para crear nuevas simulaciones. Además se establecieron las desviaciones estándar del modelo y de C/I de las *clutter classes* a 0dB para evitar discrepancias entre cada simulación respecto a los valores de *shadowing* aplicados a cada usuario y poder establecer comparaciones bajo las mismas condiciones, porque a pesar de que se fije el mismo *Generator Initialisation* para cada simulación, los valores de *shadowing* se calculan de manera aleatoria en cada una de ellas.

### V.4.1 Primer grupo de simulaciones

Se realizaron cuatro simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*) con los siguientes parámetros:

Propiedades de los schedulers:

- Target Throughput for Voice Services: Effective RLC Throughput
- Target Throughput for Data Services: Effective RLC Throughput
- Bearer Selection Criterion: Bearer Index
- Uplink Bandwidth Allocation Target: Best Bearer

Propiedades de las simulaciones:

- Max Traffic Load DL: 100 %
- Max Traffic Load UL: 100 %
- Max UL Noise Rise= 6 dB
- Generator initialisation: 1
- Number of simulations: 1
- Global Scaling Factor: 2

La Tabla 5.6 contiene la cantidad de usuarios y *throughputs* máximos y mínimos demandados por la red LTE en ambos enlaces y la Tabla 5.7 contiene las estadísticas de las cuatro simulaciones.

Gracias a los dos nuevos *Sites* se observa una reducción del porcentaje de usuarios rechazados debido a "*No Coverage*" con respecto a las simulaciones previas a las modificaciones de la red LTE. Se observa nuevamente que PF obtiene mayor *Aggregate Throughput (DL)* que Max C/I.

	Demand
Users	6,963
Active DL	3,823
Active UL	1,729
Active DL + UL	962
Inactive	449
Max Throughput Demand (DL)	931.20 Mbps
Min Throughput Demand (DL)	220.19 Mbps
Max Throughput Demand (UL)	188.84 Mbps
Min Throughput Demand (UL)	56.28 Mbps

**Tabla 5.6:** Demandas de las simulaciones del apartado V.4.1.

	RR	PF	PD	Max C/I
Active Users	6,370	6,450	6,370	6,417
Active DL	3,704	3,784	3,704	3,753
Active UL	1,712	1,712	1,712	1,712
Active DL + UL	954	954	954	952
Inactive	449	449	449	449
No Coverage	62	62	62	62
No Service	2	2	2	2
Sheduler saturation	0	0	0	0
Resource Saturation	80	0	80	33
Effective RLC Aggregate	557.21 Mbps	802.48 Mbps	507.15 Mbps	607.02 Mbps
Throughput (DL)				
Effective RLC Aggregate	187.02 Mbps	187.24 Mbps	187.02 Mbps	186.97 Mbps
Throughput (UL)				

**Tabla 5.7:** Estadísticas de las simulaciones del apartado V.4.1.

#### V.4.2 Segundo grupo de simulaciones

Se realizaron cuatro nuevas simulaciones con los mismos parámetros de las simulaciones realizadas previamente (apartado V.4.1) pero modificando el *Global Scaling Factor* a 3 para aumentar la densidad de usuarios. La Tabla 5.8 contiene la

cantidad de usuarios y *throughputs* máximos y mínimos demandados por la red LTE en ambos enlaces y la Tabla 5.9 contiene las estadísticas de las cuatro simulaciones.

Se observa que los resultados tienen el mismo comportamiento que en las simulaciones anteriores, es decir, PF obtiene el mayor *Aggregate Throughput (DL)*, seguido de Max C/I, RR y PD. Además se redujo el porcentaje de usuarios rechazados por "*No Coverage*".

	Demand
Users	10,581
Active DL	5,897
Active UL	2,573
Active DL + UL	1,421
Inactive	690
Max Throughput Demand (DL)	1,462.14 Mbps
Max Throughput Demand (DL)	342.38 Mbps
Max Throughput Demand (UL)	274.82 Mbps
Max Throughput Demand (UL)	82.42 Mbps

Tabla 5.8: Demandas de las simulaciones del apartado V.4.2.

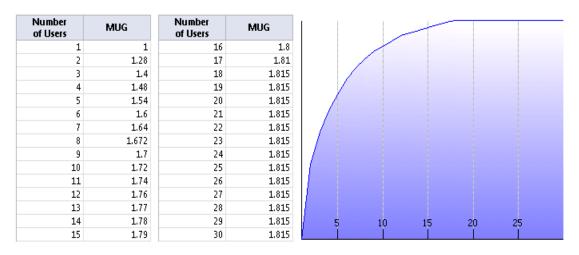
	RR	PF	PD	Max C/I
Active Users	9,352	9,759	9,352	9,581
Active DL	5,394	5,797	5,394	5,649
Active UL	2,551	2,554	2,551	2,552
Active DL + UL	1,407	1,408	1,407	1,380
Inactive	690	690	690	690
No Coverage	83	83	83	83
No Service	8	7	8	8
Sheduler saturation	0	0	0	0
Resource Saturation	448	42	448	219
Effective RLC Aggregate	595.08 Mbps	973.83 Mbps	539.78 Mbps	679.83 Mbps
Throughput (DL)				
Effective RLC Aggregate	272.11 Mbps	272.65 Mbps	272.11 Mbps	271.36 Mbps
Throughput (UL)				

**Tabla 5.9:** *Estadísticas de las simulaciones del apartado V.4.2.* 

# V.5 Ajuste de las ganancias de diversidad multiusuario (MUG) para la estrategia PF

En todas las simulaciones que se han realizado hasta este punto se ha observado que la estrategia PF obtiene los mejores *Aggregate Throughputs* incluso superando a la estrategia Max C/I que en teoría debería ser la estrategia que maximiza la capacidad de las celdas, y por tanto de la red. Por esto, se ha decidido realizar un estudio de las ganancias de diversidad multiusuario (MUG) establecidas por defecto en ATOLL.

En la Figura 5.26 se muestra la curva de MUG en función del número de usuarios que está definida por defecto en ATOLL para la estrategia PF para todos los tipos de movilidades. Se puede apreciar que la ganancia se estabiliza a partir de 18 usuarios, sin embargo, según [5], la ganancia de diversidad multiusuario de PF se estabiliza a partir de 10 usuarios pues es posible garantizar que al menos uno de ellos consiga las mejores condiciones del canal.



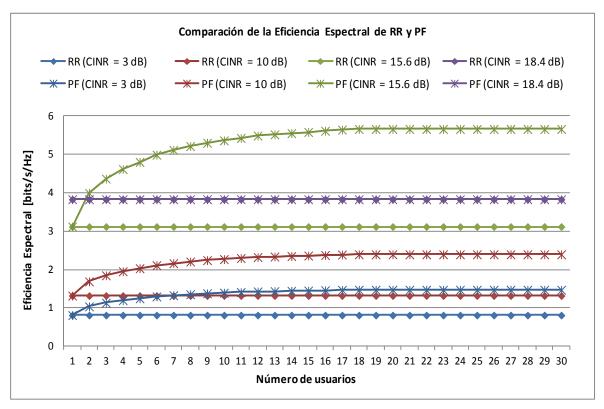
**Figura 5.26:** Valores por defecto de ATOLL de MUG en función del número de usuarios.

Es importante destacar que las simulaciones de ATOLL representan la situación de la red en un instante de tiempo específico y no tienen memoria, es decir que no se toma en cuenta la información del pasado, por esto la estrategia PF no es

implementada tal y como se define en la teoría sino que es modelada en ATOLL con el mismo algoritmo que RR pero incrementando el *Channel Throughput* que observa cada usuario por las ganancias definidas en la curva de MUG. Esto quiere decir que las ganancias establecidas en la tabla de MUG deben ser tales que no aporten un beneficio irreal a la estrategia PF, tal y como se ha observado en las simulaciones y predicciones realizadas hasta este punto.

Se realizó un estudio de la eficiencia espectral que obtienen los usuarios de una celda con la estrategia RR y con la estrategia PF con los valores de MUG establecidos por defecto en ATOLL. En la Figura 5.27 se muestra el resultado para distintas C/(I+N). Se observa que para la estrategia RR, como es lógico, se obtiene la misma eficiencia sin importar el incremento de usuarios porque RR no se beneficia de la ganancia de diversidad multiusuario por ser *unchannel-aware*. Por otro lado, en el caso de PF se observa que para un solo usuario la eficiencia es igual que para RR, a partir de 2 usuarios la eficiencia espectral se incrementa con respecto a RR y a partir de 18 usuarios se estabiliza, tal y como se ha comentado.

Es importante notar que tal y como ATOLL realiza los cálculos para la estrategia PF, la ganancia de diversidad multiusuario que se obtiene con respecto al caso de RR se mantiene constante para diferentes valores de C/(I+N) a pesar de que en la realidad la ventaja de PF sobre RR debería reducirse a medida que aumenta la C/(I+N). Es por esto que ATOLL define un C/(I+N) máximo sobre el cual se emplean las ganancias del MUG, que en este caso está definido por defecto para una C/(I+N) de 16.8 dB. En la Figura 5.27 se puede observar cómo la eficiencia espectral de PF para una C/(I+N) de 15.6 dB es muy superior que para una C/(I+N) de 18.4 dB porque en el segundo caso se supera la C/(I+N) máxima definida en ATOLL y no se emplean las ganancias del MUG, con lo cual las eficiencias espectrales para esa relación señal interferencia más ruido son exactamente iguales para RR y para PF.



**Figura 5.27:** *Influencia del tipo de estrategia en la eficiencia espectral por usuario.* 

Tomando en consideración todos los aspectos mencionados, se repitieron las simulaciones de la estrategia PF con las condiciones de los dos grupos de simulaciones realizados en el apartado V.4 para distintos valores de MUG hasta encontrar resultados que arrojaran un *Aggregate Throughput* superior con la estrategia Max C/I que con PF. En la Figura 5.28 se muestra la curva de MUG en función del número de usuarios resultantes. Se puede observar que se han disminuido los valores de ganancias de diversidad multiusuario con respecto a la Figura 5.26 y que ahora la curva se estabiliza a partir de 10 usuarios.

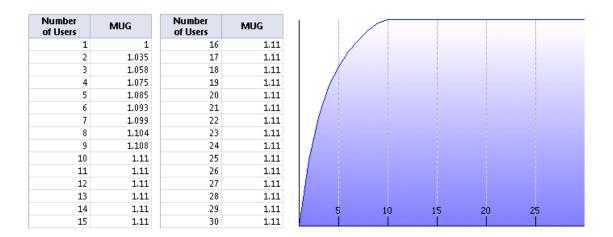


Figura 5.28: Nuevos valores de MUG en función del número de usuarios.

Las Tablas 5.10 y 5.11 contienen las estadísticas de las cuatro simulaciones del primer y segundo grupo de simulaciones del apartado V.4 respectivamente. Se puede observar que en ambos casos se ha reducido el *Aggregate Throughput* de la estrategia PF en comparación a las Tablas 5.7 y 5.9, y que Max C/I pasa a ser la estrategia que consigue la mayor capacidad de la red.

	RR	PF	PD	Max C/I
Active Users	6,370	6,403	6,370	6,417
Active DL	3,704	3,737	3,704	3,753
Active UL	1,712	1,712	1,712	1,712
Active DL + UL	954	954	954	952
Inactive	449	449	449	449
No Coverage	62	62	62	62
No Service	2	2	2	2
Sheduler saturation	0	0	0	0
Resource Saturation	80	47	80	33
Effective RLC Aggregate	557.21 Mbps	602.47 Mbps	507.15 Mbps	607.02 Mbps
Throughput (DL)				
Effective RLC Aggregate	187.02 Mbps	187.06 Mbps	187.02 Mbps	186.97 Mbps
Throughput (UL)				

Tabla 5.10: Estadísticas de las simulaciones de la Tabla 5.7 con nuevos valores de MUG para PF.

	RR	PF	PD	Max C/I
Active Users	9,352	9,478	9,352	9,581
Active DL	5,394	5,514	5,394	5,649
Active UL	2,551	2,556	2,551	2,552
Active DL + UL	1,407	1,408	1,407	1,380
Inactive	690	690	690	690
No Coverage	83	83	83	83
No Service	8	6	8	8
Sheduler saturation	0	0	0	0
Resource Saturation	448	324	448	219
Effective RLC Aggregate	595.08 Mbps	653.19 Mbps	539.78 Mbps	679.83 Mbps
Throughput (DL)				
Effective RLC Aggregate	272.11 Mbps	272.50 Mbps	272.11 Mbps	271.36 Mbps
Throughput (UL)				

**Tabla 5.11:** Estadísticas de las simulaciones de la Tabla 5.9 con nuevos valores de MUG para PF.

### V.6 Estudio de los parámetros de los schedulers en ATOLL

En todas las simulaciones realizadas hasta este punto se han mantenido constantes los parámetros de los *schedulers* de la siguiente manera:

- Target Throughput for Voice Services: Effective RLC Throughput
- Target Throughput for Data Services: Effective RLC Throughput
- Bearer Selection Criterion: Bearer Index
- Uplink Bandwidth Allocation Target: Best Bearer

Con el fin de observar el impacto de cada parámetro definido en las propiedades de los *schedulers* de ATOLL, se realizaron distintas simulaciones que se explicarán a continuación. Los parámetros comunes a todas las simulaciones son los siguientes:

- Max Traffic Load DL: 100 %
- Max Traffic Load UL: 100 %
- Max UL Noise Rise= 6 dB

- Generator initialisation: 1

- Number of simulations: 1

- Global Scaling Factor: 2

Se utilizó la configuración de la red LTE con las modificaciones realizadas en el apartado V.4 y se emplearon los valores de MUG calculados en el apartado V.5 para la estrategia PF.

La Tabla 5.12 contiene la cantidad de usuarios y *throughputs* máximos y mínimos demandados por la red LTE en ambos enlaces comunes a todas las simulaciones.

	Demand
Users	6,963
Active DL	3,823
Active UL	1,729
Active DL + UL	962
Inactive	449
Max Throughput Demand (DL)	931.20 Mbps
Min Throughput Demand (DL)	220.19 Mbps
Max Throughput Demand (UL)	188.84 Mbps
Min Throughput Demand (UL)	56.28 Mbps

**Tabla 5.12:** *Demandas para todas las simulaciones del apartado V.6.* 

### V.6.1 Estudio del Target Throughput for Voice/Data Services

Se realizaron tres grupos de simulaciones (uno para cada *Target*: *Peak RLC Throughput*, *Effective RLC Throughput* y *Application Throughput*). Cada grupo contiene cuatro simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*). La Tabla 5.13 contiene las estadísticas de los tres grupos de simulaciones para cada una de las estrategias RR, PF, PD y Max C/I.

Se puede observar que para los cuatro *schedulers* se cumple que con el *Target Throughput* establecido en *Peak RLC Throughput* se obtienen menos usuarios rechazados por "*Resource Saturation*" que en los otros tres casos, esto se debe a que

las demandas mínimas y máximas de *throughput* de cada usuario son menores porque no se toman en cuenta la reducción de *throughput* debido a las retransmisiones por errores ni a los encabezados de las capas superiores a la RLC, por lo tanto los recursos de las celdas alcanzan para más usuarios. En esta misma línea, con el *Target Throughput* establecido en *Application Throughput*, es con la que existen más usuarios rechazados por "*Resource Saturation*" porque las demandas mínimas y máximas son superiores a los otros casos, con lo cual los recursos se agotan con menos usuarios. Por esto, establecer el *Target Throughput* de los servicios de voz y datos a *Application Throughput* es el más exigente de los tres casos y planificar una red en ATOLL bajo este parámetro sería el más apropiado para los operadores si se quiere que los *throughputs* definidos para los servicios sean realmente los que obtengan los usuarios en la capa de aplicación.

	RR			PF		
	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC	Target=Application	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC	Target=Application
Number of iterations	15/100	15/100	16/100	15/100	15/100	16/100
Active Users	6,383	6,370	6,348	6,419	6,403	6,380
Active DL	3,717	3,704	3,682	3,753	3,737	3,714
Active UL	1,712	1,712	1,712	1,712	1,712	1,712
Active DL + UL	954	954	954	954	954	954
Inactive	449	449	449	449	449	449
No Coverage	62	62	62	62	62	62
No Service	2	2	2	2	2	2
Sheduler saturation	0	0	0	0	0	0
Resource Saturation	67	80	102	31	47	70
Effective RLC Aggregate	559.10 Mbps	557.21 Mbps	562.39 Mbps	603.59 Mbps	602.47 Mbps	609.11 Mbps
Throughput (DL)	_	_	_	_	_	_
Effective RLC Aggregate	184.92 Mbps	187.02 Mbps	196.82 Mbps	184.89 Mbps	187.06 Mbps	196.87 Mbps
Throughput (UL)						
		PD		Мах С/І		
	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC	Target=Application	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC	Target=Application
Number of iterations	15/100	15/100	16/100	15/100	15/100	16/100
Active Users	6,383	6,370	6,348	6,425	6,417	6,405
Active DL	3,717	3,704	3,682	3,761	3,753	3,744
Active UL	1,712	1,712	1,712	1,712	1,712	1,712
Active DL + UL	954	954	954	952	952	949
Inactive						
mactive	449	449	449	449	449	449
	62	449 62	449 62	449 62	449 62	449 62
No Coverage						
No Coverage	62	62	62	62	62	62
No Coverage No Service Sheduler saturation	62	62 2	62	62	62 2	62
No Coverage No Service Sheduler saturation Resource Saturation	62 2 0	62 2 0	62 2 0	62 2 0	62 2 0	62 2 0
No Coverage No Service	62 2 0 67	62 2 0 80	62 2 0 102	62 2 0 25	62 2 0 33	62 2 0 45

**Tabla 5.13:** Estadísticas de las simulaciones para el estudio del target throughput for voice/data services.

#### V.6.2 Estudio del Bearer Selection Criterion

Se realizaron tres grupos de simulaciones (uno para cada *Bearer Selection Criterion*: *Bearer Index, Peak RLC Throughput* y *Effective RLC Throughput*). Cada grupo contiene cuatro simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*). La Tabla 5.14 contiene las estadísticas de los tres grupos de simulaciones para cada una de las estrategias RR, PF, PD y Max C/I.

Se revisaron las asignaciones de *Radio Bearer* para cada móvil según cada uno de los criterios de asignación de los *Bearers* y se pudo observar que para los *Bearer Selection Criterion* establecidos en *Bearer Index* y *Peak RLC Throughput* los móviles obtienen el mismo *Radio Bearer* porque a medida que el índice es mayor también la eficiencia del *Bearer* es mayor, por lo tanto, como el cálculo del *Peak RLC Throughput* depende de la eficiencia del *Bearer*, coincide que el *Peak RLC Throughput* es máximo cuando se utiliza el *Bearer* de mayor índice disponible. Por otro lado, en el caso del criterio *Effective RLC Throughput* se pudo observar que a ciertos móviles se les asigna un *Radio Bearer* de menor índice que para los otros dos criterios, esto se debe a que la fórmula del *Effective RLC Throughput* depende de la BLER, por lo tanto ATOLL evalúa si es preferible asignarle al usuario un *Radio Bearer* de menor índice (y por ende de menor eficiencia) a cambio de tener una BLER igual a 0.

Es importante destacar que en el caso del criterio *Peak RLC Throughput* los cálculos de la simulación tardan más tiempo en converger, porque para cada iteración se debe calcular el *Peak RLC Throughput* para los *Bearers* disponibles y tomar el que lo maximice. Por lo tanto es preferible establecer el criterio en *Bearer Index* en el caso que se desee maximizar el *Peak RLC Throughput*.

Por último se puede observar que con el criterio *Effective RLC Throughput* se obtiene el mayor *Effective RLC Aggregate Throughput* para cada estrategia. Esto es lógico pues el objetivo de ese criterio es conseguir que cada usuario obtenga el mayor *Effective RLC User Throughput*.

	RR		PF			
	Target=Bearer index	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC	Target=Bearer index	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC
Number of iterations	15/100	75/100	36/100	15/100	81/100	29/100
Active Users	6,370	6,368	6,369	6,403	6,401	6,404
Active DL	3,704	3,704	3,703	3,737	3,737	3,738
Active UL	1,712	1,710	1,712	1,712	1,710	1,712
Active DL + UL	954	954	954	954	954	954
Inactive	449	449	449	449	449	449
No Coverage	62	62	62	62	62	62
No Service	2	2	2	2	2	2
Sheduler saturation	0	0	0	0	0	0
Resource Saturation	80	82	81	47	49	46
Effective RLC Aggregate	557.21 Mbps	557.21 Mbps	557.46 Mbps	602.47 Mbps	602.47 Mbps	603.09 Mbps
Throughput (DL)		_	_		_	_
Effective RLC Aggregate	187.02 Mbps	179.53 Mbps	184.65 Mbps	187.06 Mbps	183.70 Mbps	185.80 Mbps
Throughput (UL)					_	
		PD		Мах С/І		
	Target=Bearer index	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC	Target=Bearer index	Target=Peak RLC	Target=Effective RLC
Number of iterations	15/100	100/100	34/100	15/100	71/100	33/100
Active Users	6,370	6,369	6,369	6,417	6,416	6,417
Active DL	3,704	3,704	3,703	3,753	3,753	3,753
Active UL	1,712	1,711	1,712	1,712	1,711	1,712
Active DL + UL	954	954	954	952	952	952
Inactive	449	449	449	449	449	449
No Coverage	62	62	62	62	62	62
No Coverage No Service	62	62	62 2	62	62	62 2
_						
No Service	2	2	2	2	2	2
No Service Sheduler saturation	2	2 0	2 0	2 0	2	2 0
No Service Sheduler saturation Resource Saturation	2 0 80	2 0 81	2 0 81	2 0 33	2 0 34	2 0 33
No Service Sheduler saturation Resource Saturation Effective RLC Aggregate	2 0 80	2 0 81	2 0 81	2 0 33	2 0 34	2 0 33

**Tabla 5.14:** *Estadísticas de las simulaciones para el estudio del target bearer selection criterion.* 

### V.6.3 Estudio del Uplink Bandwidth Allocation Target

Se realizaron tres grupos de simulaciones (uno para cada *Uplink Bandwidth Allocation Target*: *Full Bandwidth, Maintain Connection* y *Best Bearer*). Cada grupo contiene cuatro simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*). La Tabla 5.15 contiene las estadísticas de los tres grupos de simulaciones para cada estrategia.

Se puede observar que con el *Target* establecido en *Full Bandwidth* se obtiene una mayor cantidad de usuarios rechazados debido a "*No Service*" en comparación a los otros dos casos, esto se debe a que el ruido es mayor porque se toma en consideración el ancho de banda total, mientras que en los otros casos se reduce el ruido gracias a la reducción del número de *Frequency Blocks* asignados a los usuarios logrando que algunos usuarios consigan al menos el menor *Radio Bearer* posible.

El *Uplink Bandwidth Allocation Target* influye únicamente en el UL y por lo tanto se esperaría observar el mismo *Effective RLC Aggregate Throughput* en el DL independientemente del *Target* seleccionado, sin embargo, esto solo sucede para los *target* establecidos en *Mantain Connection* y *Best Bearer* mientras que para *Full Bandwidth* los resultados en el DL difieren. La razón de esto se debe a que en este último caso existen menos usuarios conectados DL+UL, porque no han conseguido sus recursos en el enlace ascendente, con lo cual los recursos que se le habían asignado en el DL les son removidos y otorgados a otros usuarios activos en el DL, es por esto que bajo este *Target* se observa que hay más usuarios conectados en el DL y en consecuencia los *throughputs* son un poco mayores que en los otros casos.

Por último es importante destacar que la modificación de los parámetros de los *schedulers* no suponen un cambio relevante en cuanto a los *Aggregate Throughputs* conseguidos por cada estrategia, es decir que en todos los resultados mostrados en las Tablas 5.13, 5.14 y 5.15 se ha obtenido aproximadamente el mismo *Aggregate Throughput* para una misma estrategia independientemente de cómo se haya establecido el parámetro en estudio. Lo que quiere decir que es más relevante el

scheduler seleccionado (RR, PF, PD o Max C/I) en los resultados manera en que se definan los parámetros.	obtenidos	que la

		RR		PF					
	T . F 111 1 111		T . D .1	Target=Full bandwidth   Target=Mantain connection   Target=Best bearer					
	Target=Full bandwidth	Target=Mantain connection	Target=Best bearer	_		_			
Number of iterations	100/100	53/100	15/100	59/100	43/100	15/100			
Active Users	6,319	6,368	6,370	6,351	6,401	6,403			
Active DL	3,706	3,704	3,704	3,740	3,737	3,737			
Active UL	1,684	1,710	1,712	1,683	1,710	1,712			
Active DL + UL	929	954	954	928	954	954			
Inactive	449	449	449	449	449	449			
No Coverage	62	62	62	62	62	62			
No Service	55	3	2	57	2	2			
Sheduler saturation	0 0		0	0	0	0			
Resource Saturation	78	81	80	44	49	47			
Effective RLC Aggregate	558.75 Mbps	557.20 Mbps	557.21 Mbps	603.91 Mbps	602.47 Mbps	602.47 Mbps			
Throughput (DL)									
Effective RLC Aggregate	179.16 Mbps	174.46 Mbps	187.02 Mbps	182.81 Mbps	179.69 Mbps	187.06 Mbps			
Throughput (UL)									
		PD		Max C/I					
	Target=Full bandwidth	Target=Mantain connection	Target=Best bearer	Target=Full bandwidth	Target=Mantain connection	Target=Best bearer			
Number of iterations	40/100	58/100	15/100	44/100	49/100	15/100			
Active Users	6,316	6,359	6,370	6,363	6,415	6,417			
Active DL	3,706	3,704	3,704	3,753	3,753	3,753			
Active UL	1,681	1,701	1,712	1,683	1,710	1,712			
Active DL + UL	929	954	954	927	952	952			
Inactive	449	449	449	449	449	449			
No Coverage	62	62	62	62	62	62			

 Tabla 5.15: Estadísticas de las simulaciones para el estudio del uplink bandwidth allocation target.

507.15 Mbps

187.02 Mbps

2

80

56

33

608.23 Mbps

178.57 Mbps

2

0

35

607.01 Mbps

175.47 Mbps

2

0

33

607.02 Mbps

186.97 Mbps

No Service

Sheduler saturation

Resource Saturation Effective RLC Aggregate

Throughput (DL) Effective RLC Aggregate

Throughput (UL)

58

0

78

508.15 Mbps

177.22 Mbps

2

0

91

507.14 Mbps

171.00 Mbps

# V.7 Impacto de emplear diversidad en transmisión y recepción para cada estrategia de Packet Scheduling

En todas las simulaciones realizadas hasta este punto se ha considerado para las estaciones base una sola antena transmisora y una receptora. Asimismo, los terminales del tipo *Mobile Terminal* disponen también de una sola antena transmisora y receptora, mientras que los *MIMO Terminals* disponen de dos antenas transmisoras y receptoras. En este apartado, se realizaron distintas simulaciones modificando el número de antenas transmisoras y receptoras de las celdas para observar el impacto de emplear diversidad en la red LTE.

Cabe destacar que, a pesar de que el *MIMO Terminal* ha dispuesto de 2 antenas transmisoras y receptoras en todas las simulaciones realizadas previamente, no se ha visto beneficiado por las mismas puesto que siempre se ha establecido en los parámetros de las celdas que no se utiliza ningún tipo de diversidad (*Diversity Support DL y Diversity Support UL* están definidos en *None*), con lo cual ATOLL no considera las ganancias por diversidad que supone tener dos antenas en el terminal MIMO.

Se realizaron 8 grupos de simulaciones modificando el número de antenas transmisoras y receptoras en las celdas y manteniendo para todos los casos las características establecidas por defecto para los terminales *Mobile* y MIMO (Tabla 4.8). Para cada grupo se realizaron 4 simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*). La Tabla 5.16 contiene las características de cada grupo.

	Diversity support	Diversity suppport	Number of	Number of
	DL	UL	transmission	reception antenna
			antenna ports	ports
Grupo 1	None	None	1	1
Grupo 2	Transmit diversity	Receive diversity	1	1
Grupo 3	Transmit diversity	Receive diversity	1	2
Grupo 4	Transmit diversity	Receive diversity	2	1
Grupo 5	Transmit diversity	Receive diversity	2	2
Grupo 6	Transmit diversity	Receive diversity	2	4
Grupo 7	Transmit diversity	Receive diversity	4	2
Grupo 8	Transmit diversity	Receive diversity	4	4

**Tabla 5.16:** Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad en transmisión y recepción.

En la Tabla 5.17 se muestran algunos de los valores resultantes de las simulaciones. Al comparar los grupos 1 y 2 se puede concluir que a pesar de que en ambos casos existe solo una antena transmisora y una receptora en las celdas, al establecer en ATOLL que se emplee diversidad en transmisión y recepción el rendimiento de la red es mejor porque el terminal MIMO se beneficia de las dos antenas que posee gracias a la diversidad espacial, a diferencia del primer caso. Posteriormente se realizó un estudio detallado de los resultados por móviles de ambos grupos de simulaciones y se pudo observar que en el grupo 2 siempre la C/(I+N) que obtienen los móviles es igual o superior respecto al mismo móvil en las simulaciones del grupo 1. Es decir, al emplear diversidad en transmisión y recepción se observa cómo algunos usuarios ven incrementados sus C/(I+N) respecto al caso donde no se emplea diversidad.

En los resultados del grupo 2 se puede observar que la estrategia PF supera a Max C/I en cuanto a los *Effective RLC Aggregate Throughputs* a pesar de que se han utilizado los nuevos valores de MUG establecidos en el apartado V.5. Esto quiere decir que la estrategia PF se ve más favorecida respecto a las demás estrategias al emplear diversidad en transmisión y recepción como consecuencia del algoritmo empleado por ATOLL para los cálculos bajo dicho *scheduler* y sucede porque los usuarios consiguen *Radio Bearers* de mayores índices como consecuencia del aumento de sus C/(I+N), con lo cual los *Channel Throughputs* se incrementan y al

multiplicarlos por las ganancias de MUG, PF es capaz de superar a Max C/I nuevamente.

Se puede apreciar que los resultados correspondientes a los grupos 2 y 3 son prácticamente iguales, indicando que la presencia de una segunda antena receptora en las celdas no es necesaria puesto que el enlace ascendente no se ve favorecido por ella porque ya los usuarios obtienen elevados C/(I+N) sin emplear diversidad. También es importante destacar que en los grupos 2 y 3 no existen usuarios rechazados por "Resource Saturation" a diferencia del grupo 1 donde no se emplea diversidad, esto se debe a que al aumentar el Channel Throghput, se reducen los recursos necesarios para satisfacer las demandas mínimas y máximas de throughput de los usuarios y como consecuencia los recursos alcanzan para más usuarios, en este caso todos los usuarios consiguen al menos obtener el throughput mínimo demandado.

Con los grupos 4, 5 y 6 se obtienen los mismos resultados en cuanto a número de usuarios activos, número de usuarios rechazados y *throughputs* obtenidos para cada estrategia, reafirmando nuevamente que bajo las condiciones de la red LTE planteada, no afecta el número de antenas receptoras que se empleen en las celdas (en estos casos de 1, 2 y 4 respectivamente) mientras el número de antenas transmisoras se mantenga constante (igual a 2 para los tres casos). Lo mismo ocurre para los grupos 7 y 8 donde se utilizaron 2 y 4 antenas receptoras respectivamente y 2 antenas transmisoras.

Por último se puede apreciar que a medida que se incrementa el número de antenas de transmisión en las celdas, mayor es el número de usuarios rechazados por "No Service". Se comprobó que todos los usuarios rechazados bajo esta causa utilizan Mobile Terminals y son todos usuarios activos en el DL, esto se debe a que los únicos terminales que se benefician de la diversidad de transmisión en las celdas (diversidad en el DL) son los MIMO Terminals que disponen de dos antenas para combinar las señales constructivamente (aunque cabe recordar que en el caso de

ATOLL no se combinan las señales sino que se multiplica directamente la C/(I+N) por la ganancia de diversidad definida para los equipos de recepción en función del número de antenas transmisoras en la celda y receptoras en el móvil). Entonces, además de que los *MIMO Terminals* multiplican las C/(I+N) por las ganancias de diversidad mientras que los *Mobile Terminals* no lo hacen, éstos últimos se ven perjudicados adicionalmente porque las interferencias son mayores según más antenas dispongan las celdas interferentes al móvil en cuestión. Por esto, el empeoramiento de las condiciones de los *Mobile Terminals* se ve reflejado en un aumento del número de usuarios rechazados y en la disminución del *throughput* total de las celdas, pero cabe destacar que aquellos usuarios que sí son atendidos y que poseen *MIMO Terminals* sí se ven beneficiados al emplear diversidad y mientras más antenas transmisoras tenga la celda mayores son sus C/(I+N).

		Total connected users	Connected DL	Connected UL	Connected DL+UL	No Coverage	No Service	Scheduler saturation	Resurce saturation	Effective RLC Aggregate Thrpughput (DL)	Effective RLC Aggregate Thrpughput (UL)
	RR	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	557.21 Mbps	186.98 Mbps
0.1	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	602.47 Mbps	187.02 Mbps
Grupo 1	PD	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	507.14 Mbps	186.98 Mbps
Ö	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	607.02 Mbps	186.93 Mbps
	RR	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	720.73 Mbps	187.26 Mbps
0 2	PF	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	761.51 Mbps	187.28 Mbps
Grupo (	PD	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	690.29 Mbps	187.26 Mbps
Ö	Max C/I	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	756.13 Mbps	187.26 Mbps
	RR	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	720.64 Mbps	187.29 Mbps
Grupo 3	PF	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	761.36 Mbps	187.29 Mbps
5	PD	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	690.18 Mbps	187.29 Mbps
Ď	Max C/I	6,450	3,784	1,712	954	62	2	0	0	756.05 Mbps	187.29 Mbps
	RR	6,433	3,776	1,712	945	62	16	0	3	687.07 Mbps	187.04 Mbps
40	PF	6,437	3,779	1,712	946	62	15	0	0	731.86 Mbps	187.08 Mbps
Grupo 4	PD	6,433	3,776	1,712	945	62	16	0	3	659.25 Mbps	187.04 Mbps
Ö	Max C/I	6,434	3,777	1,712	945	62	16	0	2	732.62 Mbps	187.04 Mbps
	RR	6,433	3,776	1,712	945	62	16	0	3	686.99 Mbps	187.07 Mbps
5 00	PF	6,437	3,779	1,712	946	62	15	0	0	731.67 Mbps	187.10 Mbps
Grupo	PD	6,433	3,776	1,712	945	62	16	0	3	659.14 Mbps	187.07 Mbps
D	Max C/I	6,434	3,777	1,712	945	62	16	0	2	732.53 Mbps	187.07 Mbps
9	RR	6,433	3,776	1,712	945	62	16	0	3	686.99 Mbps	187.08 Mbps
306	PF	6,437	3,779	1,712	946	62	15	0	0	731.67 Mbps	187.10 Mbps
Grupo (	PD	6,433	3,776	1,712	945	62	16	0	3	659.14 Mbps	187.08 Mbps
9	Max C/I	6,434	3,777	1,712	945	62	16	0	2	732.53 Mbps	187.08 Mbps
_	RR	6,303	3,721	1,712	870	62	136	0	13	667.95 Mbps	185.24 Mbps
00	PF	6,318	3,733	1,712	873	62	128	0	6	713.33 Mbps	185.32 Mbps
Grupo 7	PD	6,303	3,721	1,712	870	62	136	0	13	639.26 Mbps	185.24 Mbps
0	Max C/I	6,312	3,732	1,712	870	62	136	0	4	719.97 Mbps	185.19 Mbps
00	RR	6,303	3,721	1,712	870	62	136	0	13	667.95 Mbps	185.25 Mbps
300	PF	6,318	3,733	1,712	873	62	128	0	6	713.33 Mbps	185.32 Mbps
Grupo 8	PD	6,303	3,721	1,712	870	62	136	0	13	639.26 Mbps	185.25 Mbps
0	Max C/I	6,312	3,732	1,712	870	62	136	0	4	719.97 Mbps	185.20 Mbps

**Tabla 5.17:** Resultados de las simulaciones con diversidad en transmisión y recepción.

# V.8 Impacto de emplear diversidad SU-MIMO para cada estrategia de Packet Scheduling

Para observar el impacto de emplear diversidad SU-MIMO en la red LTE se realizaron 4 grupos de simulaciones modificando el número de antenas transmisoras de las celdas manteniendo constante el número de antenas receptoras. Para cada grupo se realizaron 4 simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*). La Tabla 5.18 contiene las características de cada grupo.

	Diversity support	Diversity	Number of	Number of
	DL	suppport UL	transmission	reception antenna
			antenna ports	ports
Grupo 1	None	None	1	1
Grupo 2	SU-MIMO	SU-MIMO	1	2
Grupo 3	SU-MIMO	SU-MIMO	2	2
Grupo 4	SU-MIMO	SU-MIMO	4	2

Tabla 5.18: Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad SU-MIMO.

En la Tabla 5.19 se muestran los resultados de las simulaciones. Se puede observar que los resultados de los grupos 1 y 2 son iguales porque no se considera SU-MIMO con una sola antena transmisora y que a medida que aumenta el número de antenas transmisoras en las celdas se incrementa considerablemente el número de usuarios rechazados por "No Service" y "Resource Saturation", y como consecuencia los Effective RLC Aggregate Throughputs se reducen.

Se realizó un estudio detallado de los móviles en cada simulación y se observó que a medida que se aumenta el número de antenas transmisoras, incrementan las interferencias y por ende las C/(I+N) recibidas del canal PDSCH son peores. La razón de esto es la misma mencionada anteriormente, mientras más antenas tengan las celdas, mayor interferencia ocasionan a los móviles de otras celdas. Posteriormente se centró el estudio únicamente en los usuarios con *MIMO Terminals* porque son los únicos que pueden favorecerse por la diversidad SU-MIMO

y se observó que solo un pequeño porcentaje obtiene *Channel Throughputs* superiores empleando SU-MIMO respecto al caso donde no se usa diversidad.

Los resultados indican entonces que las condiciones de C/(I+N) no son suficientemente buenas en la mayoría de los casos como para que los móviles de la red puedan verse favorecidos de emplear diversidad SU-MIMO. Al contrario, la mayoría se ve perjudicada con el aumento de las interferencias producto de tener más antenas transmisoras.

Por otro lado, cabe resaltar que en ATOLL el algoritmo al emplear SU-MIMO consiste en calcular las C/(I+N), seleccionar el *Radio Bearer* para cada móvil y posteriormente, si se trata de un *MIMO Terminal*, incrementar las eficiencias de los *Radio Bearers* de manera que los *Channel Throughputs* sean superiores respecto a los que se obtendrían con las eficiencias originales. Los valores utilizados para incrementar las eficiencias de los *Bearers* son definidos por el usuario en función del número de antenas transmisoras y receptoras y de las C/(I+N), es posible que, así como los valores por defecto de MUG para PF no eran adecuados, también los valores de las ganancias para SU-MIMO no sean las más apropiadas según vienen establecidas en ATOLL. En este sentido, habría que modificar los valores para obtener resultados que se asemejen a estudios reales para distintas combinaciones de antenas transmisoras y receptoras en las celdas y los móviles. Sin embargo, en este trabajo no se llevó a cabo dicha investigación y se deja como un posible punto de partida para investigaciones más profundas referentes a la diversidad SU-MIMO en ATOLL.

		Total connected users	Connected DL	Connected UL	Connected DL+UL	No Coverage	No Service	Scheduler saturation	Resurce saturation	Effective RLC Aggregate Thrpughput (DL)	Effective RLC Aggregate Thrpughput (UL)
-	RR	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	557.21 Mbps	186.98 Mbps
	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	602.47 Mbps	187.02 Mbps
Grupo	PD	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	507.14 Mbps	186.98 Mbps
	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	607.02 Mbps	186.93 Mbps
2	RR	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	557.19 Mbps	187.1 Mbps
00.	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	602.47 Mbps	187.13 Mbps
Grupo	PD	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	507.12 Mbps	187.10 Mbps
0	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	607.00 Mbps	187.05 Mbps
	RR	6,032	3,381	1,712	939	62	76	0	344	414.49 Mbps	186.63 Mbps
500	PF	6,090	3,438	1,712	940	62	72	0	290	452.92 Mbps	186.79 Mbps
Grupo	PD	6,032	3,381	1,712	939	62	76	0	344	358.59 Mbps	186.63 Mbps
0	Max C/I	6,215	3,585	1,712	918	62	76	0	161	492.96 Mbps	186.01 Mbps
4	RR	5,358	2,813	1,712	833	62	522	0	572	270.59 Mbps	183.32 Mbps
200	PF	5,455	2,910	1,712	833	62	516	0	481	291.97 Mbps	183.35 Mbps
Grupo	PD	5,358	2,813	1,712	833	62	522	0	572	236.19 Mbps	183.32 Mbps
	Max C/I	5,612	3,110	1,712	790	62	522	0	318	350.82 Mbps	187.27 Mbps

**Tabla 5.19:** Resultados de las simulaciones con diversidad SU-MIMO.

# V.9 Impacto de emplear diversidad AMS para cada estrategia de Packet Scheduling

Para observar el impacto de emplear diversidad AMS se estableció el *AMS Threshold* en 5 dB, para que ATOLL pueda emplear diversidad en transmisión y recepción o SU-MIMO dependiendo si el usuario supera dicho umbral. Se realizaron 8 grupos de simulaciones modificando el número de antenas transmisoras y receptoras en las celdas. Para cada grupo se realizaron 4 simulaciones (una para cada estrategia de *Packet Scheduling*). La Tabla 5.20 contiene las características de cada grupo.

	Diversity support	Diversity	Number of	Number of
	DL	suppport UL	transmission	reception antenna
			antenna ports	ports
Grupo 1	None	None	1	1
Grupo 2	AMS	AMS	1	1
Grupo 3	AMS	AMS	1	2
Grupo 4	AMS	AMS	2	1
Grupo 5	AMS	AMS	2	2
Grupo 6	AMS	AMS	2	4
Grupo 7	AMS	AMS	4	2
Grupo 8	AMS	AMS	4	4

**Tabla 5.20:** Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad AMS.

En la Tabla 5.21 se muestran los resultados de las simulaciones. Se puede apreciar que con los grupos 2 y 3 se obtiene la mayor cantidad de usuarios conectados y por ende los mayores *Aggregate Throughputs* pero que las diferencias con respecto al primer grupo, que no emplea diversidad, son pocas. Se repite la tendencia observada en los casos anteriores donde al aumentar el número de antenas transmisoras se incrementa el número de usuarios rechazados por la red. Si se comparan los resultados de cada grupo con los obtenidos en el apartado V.7 (Tabla 5.17) se puede apreciar una disminución en la cantidad de usuarios conectados y en los *Aggregate Throughputs*, esto indica que los usuarios de la red LTE planteada se

ven más favorecidos por diversidad SU-MIMO.	usar	diversidad	en	transmisión	у	recepción	que	por	usar

		Total connected users	Connected DL	Connected UL	Connected DL+UL	No Coverage	No Service	Scheduler saturation	Resurce saturation	Effective RLC Aggregate Thrpughput (DL)	Effective RLC Aggregate Thrpughput (UL)
_	RR	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	557.21 Mbps	186.98 Mbps
od	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	602.47 Mbps	187.02 Mbps
Grupo 1	PD	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	507.14 Mbps	186.98 Mbps
0	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	607.02 Mbps	186.93 Mbps
2	RR	6,371	3,705	1,712	954	62	2	0	79	561.90 Mbps	187.22 Mbps
. od	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	606.74 Mbps	187.26 Mbps
Grupo 2	PD	6,371	3,705	1,712	954	62	2	0	79	514.10 Mbps	187.22 Mbps
0	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	611.23 Mbps	187.18 Mbps
	RR	6,371	3,705	1,712	954	62	2	0	79	561.89 Mbps	187.29 Mbps
Grupo 3	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	606.74 Mbps	187.29 Mbps
Tr.	PD	6,371	3,705	1,712	954	62	2	0	79	514.08 Mbps	187.29 Mbps
0	Max C/I	6,417	3,753	1,712	952	62	2	0	33	611.22 Mbps	187.24 Mbps
_	RR	6,037	3,386	1,712	939	62	75	0	340	420.74 Mbps	186.76 Mbps
90	PF	6,098	3,446	1,712	940	62	71	0	283	459.75 Mbps	186.92 Mbps
Grupo 4	PD	6,037	3,386	1,712	939	62	75	0	340	367.14 Mbps	186.76 Mbps
0	Max C/I	6,221	3,591	1,712	918	62	75	0	156	496.65 Mbps	186.14 Mbps
S	RR	6,037	3,386	1,712	939	62	75	0	340	420.72 Mbps	186.83 Mbps
00.5	PF	6,098	3,446	1,712	940	62	71	0	283	459.69 Mbps	186.95 Mbps
Grupo	PD	6,037	3,386	1,712	939	62	75	0	340	367.12 Mbps	186.83 Mbps
0	Max C/I	6,221	3,591	1,712	918	62	75	0	156	496.57 Mbps	186.21 Mbps
10	RR	6,037	3,386	1,712	939	62	75	0	340	420.72 Mbps	186.83 Mbps
Grupo 6	PF	6,098	3,446	1,712	940	62	71	0	283	459.69 Mbps	186.95 Mbps
ird	PD	6,037	3,386	1,712	939	62	75	0	340	367.12 Mbps	186.83 Mbps
0	Max C/I	6,221	3,591	1,712	918	62	75	0	156	496.64 Mbps	186.21 Mbps
_	RR	5,366	2,821	1,712	833	62	514	0	572	274.63 Mbps	183.51 Mbps
00.	PF	5,464	2,919	1,712	833	62	509	0	479	297.36 Mbps	183.52 Mbps
Grupo 7	PD	5,366	2,821	1,712	833	62	514	0	572	241.71 Mbps	183.51 Mbps
0	Max C/I	5,622	3,120	1,712	790	62	514	0	316	354.50 Mbps	182.46 Mbps
00	RR	5,366	2,821	1,712	833	62	514	0	572	274.63 Mbps	183.51 Mbps
Grupo 8	PF	5,464	2,919	1,712	833	62	509	0	479	297.34 Mbps	183.52 Mbps
Jruj	PD	5,366	2,821	1,712	833	62	514	0	572	241.71 Mbps	183.51 Mbps
0	Max C/I	5,622	3,120	1,712	790	62	514	0	316	354.50 Mbps	182.47 Mbps

**Tabla 5.21:** Resultados de las simulaciones con diversidad AMS.

No obstante, se hizo un estudio de los resultados por móviles para los distintos grupos de simulaciones y se pudo observar que aquellos que emplean *MIMO Terminals* y que reciben una C/(I+N) por debajo del umbral definido ven aumentados sus C/(I+N) en los casos donde se aumenta el número de antenas transmisoras respecto al caso donde no se emplea diversidad. Por otro lado, algunos de los usuarios con *MIMO Terminals* que superan el umbral, ven aumentados los *Channel Throughputs* porque se les aplica la ganancia en las eficiencias de los *Radio Bearers*.

Por otro lado, al igual que en los apartados V.7 y V.8 donde solo se empleaba diversidad en transmisión y recepción o SU-MIMO respectivamente, en este caso los terminales que disponen de *Mobile Terminals* también se ven afectados por las interferencias y no se benefician de las diversidades, por esto el número de usuarios rechazados aumenta a medida que se usan más antenas y el *Aggregate Throughput* total de las celdas disminuye.

En la Tabla 5.22 se muestran los resultados de cinco móviles de la red LTE en cuanto a la relación C/(I+N) recibida del canal PDSCH, *Radio Bearer* seleccionado y *Peak RLC Channel Throughput* calculado para cada usuario bajo las condiciones de los grupos 1, 5 y 8. Cabe destacar que los cinco usuarios utilizan un *MIMO Terminal* y que se encuentran activos en el DL.

Se puede observar que, sin emplear diversidad (grupo 1), los usuarios con ID 851 y 840 reciben una C/(I+N) del canal PDSCH por debajo del umbral, que fue definido en 5 dB. Por ello, a medida que se utilizan más antenas transmisoras en la base (grupos 5 y 8), estos usuarios se benefician en mayor medida de la diversidad en transmisión y ven aumentados sus C/(I+N). Al aumentar sus C/(I+N) pueden obtener *Radio Bearers* de mayor índice, y con ello, mayores *Channel Throughputs*.

Por otro lado, los usuarios con ID 18 y 28 reciben una C/(I+N) superior al *AMS Threshold* sin emplear diversidad, con lo cual, a medida que se incrementa el número de antenas transmisoras, las C/(I+N) que reciben son peores porque aumentan las interferencias. Sin embargo, se observa que en el grupo 5, a pesar de

que la C/(I+N) es peor que en el grupo 1 y de que se asignan *Radio Bearers* de igual o menor índice, los *Channel Throughputs* son mayores porque al emplear diversidad SU-MIMO aumenta la eficiencia de los *Radio Bearers*. Para estos mismos usuarios con las condiciones del grupo 8 se observa que la ganancia aplicada a las eficiencias de los *Radio Bearers* no es suficiente para compensar el aumento de interferencias, y por ello los *Channel Throughputs* son peores con respecto a los resultados del grupo 5.

Por último, el usuario con ID 48 obtiene el *Radio Bearer* de mayor índice en los tres casos pero se puede observar que bajo las condiciones del grupo 1, es decir, sin diversidad, obtiene el *Channel Throughput* más bajo. Con esto se comprueba que los usuarios se benefician en mayor medida de la diversidad SU-MIMO mientras mayores sean sus condiciones de canal.

	Grupo 1				Grupo 5		Grupo 8			
ID	PDSCH C/(I+N) (DL) (dB)	Bearer (DL)	Peak RLC Channel Throughput (DL) (kbps)	PDSCH C/(I+N) (DL) (dB)	Bearer (DL)	Peak RLC Channel Throughput (DL) (kbps)	PDSCH C/(I+N) (DL) (dB)	Bearer (DL)	Peak RLC Channel Throughput (DL) (kbps)	
851	0.4	4 (QPSK 1/3)	2,041.59	6.18	6 (QPSK 3/5)	3,815.24	8.52	7 (16QAM 1/3)	4,647.16	
840	2.6	5 (QPSK 1/2)	2,976.19	8.25	7 (16QAM 1/3)	4,791.27	10.42	8 (16QAM 1/2)	6,024.06	
18	6.53	6 (QPSK 3/5)	3,990.19	3.78	6 (QPSK 3/5)	4,913.42	1.15	5 (5QPSK 1/2)	3,320.27	
28	15.46	12 (64QAM 3/5)	13,242.84	12.7	10 (64QAM 1/2)	13,888.53	10.08	8 (16QAM 1/2)	9,015.77	
48	29.44	15 (64QAM 11/12)	18,850.43	26.69	15 (64QAM 11/12)	31,994.34	24.06	15 (64QAM 11/12)	30,616.09	

**Tabla 5.22:** Comparación de los resultados por móviles al emplear AMS con distintas cantidades de antenas transmisoras y receptoras.

# V.10 Impacto de emplear diversidad MU-MIMO para cada estrategia de Packet Scheduling

Para observar el impacto de emplear diversidad MU-MIMO se estableció el *MU-MIMO Threshold* de 5 dB y se realizaron 2 grupos de simulaciones según se muestra en la Tabla 5.23.

	Diversity support	Diversity	Number of	Number of
	DL	suppport UL	transmission	reception antenna
			antenna ports	ports
Grupo 1	None	None	1	2
Grupo 2	None	MU-MIMO	1	2

**Tabla 5.23:** Características de los grupos de simulaciones para estudio de diversidad MU-MIMO.

En la Tabla 5.24 se muestran los resultados de los dos grupos. Se puede observar que se obtiene la misma cantidad de usuarios activos, usuarios rechazados y que los *Effective RLC Aggregate Throughputs* son iguales en ambos casos. Esto se debe a que la diversidad MU-MIMO en ATOLL solo se emplea en el UL, pero la red LTE planteada en este proyecto está limitada por el DL mientras que en el UL siempre se ha podido satisfacer las demandas máximas de los usuarios incluso sin necesidad de emplear diversidad. Por ello, no se observa un incremento en los *Aggregate Throughputs* puesto que en ambos casos todos los usuarios conectados UL obtienen el *Max Throughput Demand*.

Sin embargo, se realizó un estudio por celdas y sí se observa que en el caso del segundo grupo los *Traffic Loads UL* son menores respecto al primer grupo debido a que se multiplexan los usuarios en un mismo dominio tiempo-frecuencia reduciendo de esta manera la cantidad de recursos usados por las celdas para satisfacer las demandas de los usuarios. En la Tabla 5.25 se muestran los *UL Traffic Loads* para los 15 *Transmitters* más cargados en el enlace ascendente.

		Total	Connected	Connected	Connected	No	No	Scheduler	Resurce	Effective RLC	Effective RLC
		connected	DL	UL	DL+UL	Coverage	Service	saturation	saturation	Aggregate	Aggregate
		users								Thrpughput(DL)	Thrpughput(UL)
	RR	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	557.21 Mbps	186.98 Mbps
100	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	602.47 Mbps	187.02 Mbps
Grupo	PD	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	507.14 Mbps	186.98 Mbps
	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	607.02 Mbps	186.93 Mbps
	RR	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	557.21 Mbps	186.98 Mbps
202	PF	6,403	3,737	1,712	954	62	2	0	47	602.47 Mbps	187.02 Mbps
Grupo	PD	6,370	3,704	1,712	954	62	2	0	80	507.14 Mbps	186.98 Mbps
	Max C/I	6,417	3,753	1,712	954	62	2	0	33	607.02 Mbps	186.93 Mbps

Tabla 5.24: Resultados de las simulaciones con diversidad MU-MIMO.

Transmitter	Traffic Load UL	Traffic Load UL
	(Grupo 1)	(Grupo 2)
Site 63_1	38.66%	32.50%
Site 82_1	36.23%	22.45%
Site 81_1	25.90%	20.41%
Site 12_1	23.54%	15.31%
Site 32_2	21.04%	12.70%
Site 20_3	20.94%	13.72%
Site 1_2	20.10%	13.19%
Site 2_3	19.45%	18.37%
Site 51_3	19.19%	13.26%
Site 34_1	16.99%	9.98%
Site 27_2	16.77%	10.2%
Site 20_1	15.95%	11.18%
Site 19_3	15.52%	9.38%
Site 43_1	15.36%	9.5%
Site 26_3	14.63%	8.46%

 Tabla 5.25: Comparación de los Traffic Loads UL sin diversidad y con MU-MIMO

IMPACTO DI	E LAS ESTRAT	EGIAS DE PA	ACKET SCHE	JULING	

#### CAPÍTULO VI

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La técnica de *Packet Scheduling* empleada en una red LTE condiciona en gran medida el rendimiento que se puede obtener en cuanto a *throughput* total por celda y a número de usuarios conectados en la red. Los estándares dejan a libertad de cada operador la selección de la técnica a emplear en sus redes según el criterio que cada uno considere más importante, sea por ejemplo la obtención del mayor *Aggregate Throughput*, la repartición más justa posible, la simplicidad en los circuitos o estrategias que consigan un equilibrio entre varios criterios.

En ATOLL es posible seleccionar una de cuatro técnicas de *Packet Scheduling* diferentes para llevar a cabo las funciones de gestión de recursos radio en cada celda: *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF), *Proportional Demand* (PD) y *Maximum C/I* (Max C/I). En este trabajo se planificó una red LTE para posteriormente observar el rendimiento de la red al emplear cada una de las estrategias mencionadas realizando distintas simulaciones y predicciones disponibles en ATOLL.

De los resultados obtenidos en las primeras pruebas realizadas se pudo concluir que no es posible analizar las distintas estrategias de *Packet Scheduling* en ATOLL haciendo uso de predicciones de cobertura por *throughput* del tipo *Effective RLC Cell Capacity* con condiciones de carga tomadas del *Cells Table* porque se rigen únicamente de los valores de *Traffic Loads* y *UL Noise Rise* establecidos por el usuario independientemente del *scheduler* seleccionado. Sin embargo, en pruebas sucesivas se concluyó que incluso realizando simulaciones previas para cada *scheduler* y tomando en las predicciones los valores de *Traffic Loads* y *UL Noise Rise* de los resultados de dichas simulaciones, tampoco es posible analizar las distintas estrategias mediante este tipo de predicciones porque las cargas de tráfico son siempre iguales para RR, PD y Max C/I en tanto que el *Channel Throughput* en la

ubicación de cada usuario es igual para las tres estrategias, a diferencia de PF que obtiene mayores *Channel Throughputs* y consigue mejores resultados.

Por otro lado, las predicciones de cobertura por *throughput* del tipo *Effective RLC Aggregate Throughput* permiten ilustrar los resultados del *throughput* total por celda y sí muestran las diferencias obtenidas según se emplee una de las cuatro técnicas de *Packet Scheduling*. Sin embargo, los *Aggregate Throughputs* por celdas también pueden apreciarse directamente en los resultados de cada simulación además de las estadísticas y el detalle desglosado por *Sites, Cells* y *Mobiles*, por lo que a lo largo del trabajo no se realizaron más predicciones y se limitó el estudio a los resultados de las simulaciones.

Después de distintas simulaciones se pudo apreciar que con la estrategia PF siempre se obtenía el mayor Aggregate Throughput de la red, a pesar de que en teoría la estrategia Max C/I se caracteriza por tener ese objetivo. En este sentido, es importante mencionar que en ATOLL la única estrategia que se beneficia por la ganancia de diversidad multiusuario es PF aunque, por su definición, Max C/I también es channel-aware. Por lo antes mencionado se realizó un estudio detallado de los valores definidos en el programa para las ganancias de diversidad multiusuario en función del número de usuarios y se modificaron de forma tal que los resultados obtenidos en diversas simulaciones arrojaran los mayores Aggregate Throughputs bajo la estrategia Max C/I. Sin embargo, a pesar de que se pueden modificar los valores de ganancias de diversidad multiusuario y ajustarlos para que los resultados sean más acordes a la realidad, a juicio del autor, la estrategia PF no es modelada adecuadamente en ATOLL porque el algoritmo empleado en el programa no corresponde al definido en la teoría y empleado en los sistemas reales, sino que utiliza el mismo algoritmo que RR con la diferencia de que incrementa el Channel Throughput en la ubicación de cada usuario. Cabe resaltar que la limitación en este caso se debe a que las simulaciones corresponden a la situación de la red en un instante de tiempo y no tienen memoria del pasado.

Otro aspecto de relevancia que vale la pena mencionar a partir de los estudios realizados es que en ATOLL, para analizar las diferencias en el rendimiento de la red según cada estrategia de *Packet Scheduling*, es indispensable que las condiciones de la red (p. ej. densidades de usuarios y demandas mínimas y máximas de los servicios) sean tales que los recursos de las celdas no se agoten en el proceso de satisfacer las demandas mínimas de *throughput* de los usuarios, ni por el contrario, que todos los usuarios obtengan sus demandas máximas de *throughput*. En el primer caso porque los *schedulers* en ATOLL entran en juego una vez se hayan satisfecho las demandas mínimas de todos los usuarios y en el segundo caso porque da igual la manera en que se repartan los recursos si al final todos obtienen el *throughput* que demandan sin que se agoten los recursos de la celda.

También cabe destacar que los resultados de las simulaciones y las predicciones pueden presentar incongruencias entre sí porque en ATOLL el shadowing se calcula diferente en cada caso. En las simulaciones se utilizan valores aleatorios para el enlace entre cada usuario y su celda servidora, mientras que en las predicciones se utilizan valores fijos según cada píxel del mapa. Para evitar estas diferencias es necesario que se establezcan el Model Standard Deviation y el C/I Standard Deviation de las clutter classes en 0 dB y que las predicciones se realicen sin considerar el shadowing. Incluso es necesario establecer los valores según se ha comentado si se quiere obtener resultados iguales entre simulaciones, a pesar de que sean realizadas con la misma semilla.

Con los resultados obtenidos al emplear distintas técnicas de diversidad se pudo observar que en la mayoría de los casos eran menos los usuarios que se veían favorecidos por las ganancias de diversidad que aquellos que se veían perjudicados por el aumento de interferencias a medida que se empleaban más antenas transmisoras en las celdas. En este sentido se recomienda que futuros proyectos realizados en ATOLL emprendan una investigación más detallada de las técnicas de diversidad disponibles en el programa donde se analicen los valores establecidos por defecto para las ganancias de diversidad, porque para la red LTE desarrollada en este

trabajo los valores tendrían que ser modificados para obtener resultados más acorde a la realidad.

Son muchos los campos que pueden ser analizados en las redes LTE en ATOLL, en este trabajo la investigación se centró en las estrategias de *Packet Scheduling* pero se recomienda realizar futuras investigaciones que abarquen los temas de coordinación de interferencia intercelular (ICIC), control de potencia fraccional (*Fractional Power Control*) y el empleo de antenas inteligentes (*Smart Antennas*). Por último, sería interesante también aprovechar las herramientas de ATOLL para realizar proyectos que combinen múltiples tecnologías de acceso radio 3GPP (p.ej. GSM/GPRS/EDGE, UMTS/HSPA y LTE) que pueden ser llevadas a cabo utilizando el *Template "3GPP Multi-RAT"*.

#### **CAPÍTULO VII**

#### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] ITU. (2011). *ICT Facts and Figures*. Retrieved 1 3, 2012, from ITU World Telecommunication: http://www.itu.int/ITU-D/ict/facts/2011/material/ICTFactsFigures2011.pdf
- [2] Lingyang, S., & Jia, s. (2011). Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE. Boca Raton: CRC Press.
- [3] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2009). *LTE The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Chichester: Wiley.
- [4] ITU. (2010, Diciembre 6). ITU World Radiocommunication Seminar highlights future communication technologies. Retrieved from ITU Newsroom Press Release: http://www.itu.int/net/pressoffice/press\_releases/2010/48.aspx
- [5] Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Barcelona: Fundación Vodafone España.
- [6] Forsk. (2011). Atoll User Manual Radio version 3.1.0.
- [7] Ghosh, A., Zhang, J., Andrews, J., & Muhamed, R. (2011). *Fundamentals of LTE*. Boston: Prentice Hall.
- [8] Moosavi, R., Eriksson, J., Larsson, E., Niclas, W., Frenger, P., & Gunnarsson, F. (2010, Agosto 4). Comparison of Strategies for Signaling of Scheduling Assignments in Wireless OFDMA.
- [9] Forsk. (2011). Technical Reference Guide version 3.1.0.