



Universidad Católica Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



Análisis de las Estrategias de Gestión del Espectro Radioeléctrico en un Sistema LTE con la herramienta Atoll

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:

Eduardo José López Díaz

TUTOR:

Anna Umbert Juliana

PROFESOR GUÍA:

Mayra Narvaez

FECHA:

Julio de 2012



Universidad Católica Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



Análisis de las Estrategias de Gestión del Espectro Radioeléctrico en un Sistema LTE con la herramienta Atoll

REALIZADO POR:

Eduardo José López Díaz

TUTOR:

Anna Umbert Juliana

PROFESOR GUÍA:

Mayra Narvaez

FECHA:

Julio de 2012

DEDICATORIA

*Con mucho orgullo y cariño, dedico este trabajo a mi mamá y a mi papá
por su tiempo, dedicación y esfuerzo infinito; sin ustedes no sería quien
soy, ni estaría donde estoy...*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi tutora y directora de proyecto Anna Umbert por ofrecerme la posibilidad de desarrollar este proyecto, por siempre tener la puerta abierta para cualquier duda que surgiera, así como por sus recomendaciones y críticas que me guiaron durante la elaboración de cada uno de los puntos que contiene.

A todos los profesores de la UCAB y la UPC que me transfirieron miles de conocimientos y que me quitaron cientos de horas de sueño, pero que sin ellos no sabría muchas cosas de las que sé ahora.

A mi hermano, por sus palabras y consejos que me da en todo momento, por su preocupación constante para que yo sea un mejor profesional y persona, y aunque a veces no le haga caso siempre he valorado sus ideas y pensamientos, especialmente para este trabajo ya que sin querer se transformaron en factores determinantes para lograr la culminación del mismo.

A todos mis amigos y seres queridos, ya que estando lejos o cerca siempre me han hecho reír, reflexionar y recordar que la vida es mucho más que estudiar.

A la vida por sus ironías, por regalarme todos aquellos momentos buenos y malos, por obligarme a crecer y enseñarme a valorar las cosas que de verdad importan.

A Dios, porque aunque muchas veces lo olvido, sé que siempre está ahí conmigo, dándome la fuerza necesaria para seguir adelante.

Por último a mis padres, porque no hay gracias suficientes que devuelvan todo lo que ellos me han dado; esto es por ustedes.

RESUMEN

El Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, con el fin de mantenerse actualizado con las últimas tendencias tecnológicas en el área de redes móviles se vio con la necesidad de estudiar y analizar los nuevos estándares emergentes como LTE (*Long Term Evolution*), y a través de Atoll, un software de planificación radio y optimización de redes móviles, se buscó evaluar y comprender las diferentes características del estándar de una manera más práctica, abriendo la posibilidad de instruir con mayor facilidad a las futuras generaciones en el campo de las telecomunicaciones.

Este proyecto se basó inicialmente en la planificación de una red LTE, que después fue utilizada para analizar las estrategias de gestión del espectro radioeléctrico, como la coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) y los esquemas de reuso frecuencial con factor de reuso igual a 1 y 3, comparando su desempeño en cuestión de *throughput* y nivel de relación portadora a ruido más interferencia alcanzable en ambos enlaces. De igual forma, se estudió el comportamiento de la estrategia ICIC para distintos escenarios generados a partir del aumento de la densidad de usuarios, modificación de la configuración de los servicios y el uso combinado con técnicas MIMO.

Entre los resultados más importantes cabe destacar que el uso de la estrategia ICIC en un entorno que no sea necesario resulta perjudicial para el funcionamiento del sistema y que la principal ventaja se ve reflejada en una mayor área de cobertura en comparación a las demás estrategias.

Palabras Claves: LTE, Atoll, Planificación Radio, Espectro Radioeléctrico, ICIC.

ABSTRACT

The Mobile Communications Research Group as part of the Signal Theory and Communications Department of the Polytechnic University of Catalonia, in order to keep up with the latest technological trends in the mobile networks field, saw the need to study and analyze the new emerging mobile standards such as LTE (Long Term Evolution), and through Atoll, a mobile network radio planning and optimization software, was sought to evaluate and understand the different characteristics of LTE in a more practical manner, opening the possibility to instruct more easily to the future generations in the telecommunications field.

This project was initially based on planning a LTE network, which was then used to analyze strategies of spectrum management such as the interference coordination between cells (ICIC) and frequency reuse schemes with a reuse factor equal to 1 and 3, by comparing their performance with respect to the throughput and carrier to interference plus noise ratio achievable levels in both links. In addition, was studied the behavior of ICIC strategy for different scenarios generated from the increased user density, changing the configuration of services, and the combined use with MIMO's techniques.

Among the most important outcomes it is highlighted that the use of ICIC strategy in an environment where it is not necessary becomes prejudicial to the system performance and that the main advantage is reflected in a larger coverage area in comparison to other strategies.

Keywords: LTE, Atoll, Radio Planning, Radio Spectrum, ICIC.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	<i>i</i>
AGRADECIMIENTOS	<i>iii</i>
RESUMEN	<i>v</i>
ABSTRACT	<i>vii</i>
ÍNDICE GENERAL	<i>ix</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>xiii</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>xvii</i>
INTRODUCCIÓN	<i>xix</i>
CAPÍTULO I.	<i>1</i>
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	<i>1</i>
I.1 PROPUESTA	<i>1</i>
I.2 Objetivos	<i>1</i>
I.2.1 Objetivo General	<i>1</i>
I.2.2 Objetivos Específicos	<i>1</i>
I.3 Limitaciones y Alcances	<i>2</i>
I.3.1 Limitaciones	<i>2</i>
I.3.2 Alcances	<i>2</i>
CAPÍTULO II.	<i>3</i>
MARCO REFERENCIAL	<i>3</i>
II.1 LTE (<i>Long Term Evolution</i>)	<i>3</i>
II.1.1 Arquitectura del Sistema LTE	<i>4</i>
II.1.2 Tecnologías de Nivel Físico	<i>6</i>
II.1.3 Interfaz Radio	<i>17</i>
II.1.4 Gestión de Recursos Radio y del Espectro Radioeléctrico	<i>24</i>
II.2 Planificación Radio Frecuencial (RF) de Redes LTE	<i>30</i>
II.2.1 Fase 1: Balance de Potencias Inicial.	<i>31</i>
II.2.2 Fase 2: Simulaciones del Entorno.	<i>31</i>
II.2.3 Fase 3: Puesta a Punto y Optimización	<i>32</i>
II.2.4 Fase 4: Optimización Post-despliegue.	<i>33</i>

CAPÍTULO III.	35
METODOLOGÍA	35
III.1 Etapa de Investigación	35
III.2 Planificación de Red	35
III.3 Evaluación y Configuración Inicial de la Red	36
III.4 Evaluación del Rendimiento de la Red	36
CAPÍTULO IV.	37
ESTUDIOS PREVIOS	37
IV.1 Investigación Inicial	37
IV.1.1 Definiciones de Atoll	38
IV.1.2 Modelado de Tráfico en Atoll.	44
IV.2 Planificación de red LTE basada en Atoll	48
IV.2.1 Configuración Inicial.	48
IV.2.2 Estudios de Nivel de Señal	51
IV.2.3 Estudios de Calidad de Señal.	57
CAPÍTULO V.	65
ESCENARIOS, RESULTADOS Y ANÁLISIS.	65
V.1 ICIC y Esquemas de Reúso de Frecuencia en Predicciones	65
V.1.1 PDSCH C/(I+N) (<i>Downlink</i>)	72
V.1.2 PUSCH C/(I+N) (<i>Uplink</i>)	73
V.1.3 <i>Effective RLC Channel Throughput (Downlink)</i>	74
V.1.4 <i>Effective RLC Channel Throughput (Uplink)</i>	76
V.2 ICIC y Esquemas de Reúso de Frecuencia en Simulaciones	78
V.2.1 Distribución de Usuarios según el Estado de Conexión	78
V.2.2 Distribución de Usuario por Servicio en uso	80
V.2.3 Carga de Tráfico de las Celdas	83
V.2.4 Asignación de Radio <i>Bearer</i>	85
V.3 Aplicación de la Estrategia ICIC en el <i>Downlink</i> , <i>Uplink</i> , o ambos.	88
V.4 Variación de la Densidad de Usuarios de la Red	91
V.4.1 PDSCH C/(I+N)	93
V.4.2 PUSCH C/(I+N)	95
V.4.3 <i>Effective RLC Channel Throughput Downlink Uplink</i>	95

V.4.4	<i>Effective RLC Channel Throughput Uplink</i>	97
V.4.5	Distribución de Usuarios según Estado de Conexión (x2, x3, x5 y x10)	97
V.5	Modificación de RB Mínimos requeridos por Servicio.	100
V.6	Impacto de utilizar servicios simétricos sobre el <i>uplink</i>	103
V.6.1	PUSCH C/(I+N) (<i>Uplink</i>)	108
V.6.2	PUSCH (I+N) (<i>Uplink</i>)	108
V.7	Técnicas MIMO con y sin ICIC.	109
V.7.1	<i>Effective RLC Channel Throughput Downlink</i> con Técnicas MIMO.	114
V.7.2	<i>Effective RLC Channel Throughput Uplink</i> con Técnicas MIMO.	115
CAPÍTULO VI.		117
CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS		117
BIBLIOGRAFÍA		123
APÉNDICE A		125
NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES		125
APÉNDICE B		129
CÁLCULO DE PDSCH & PUSCH C/(I+N)		129
APÉNDICE C		147
CÁLCULO DE PEAK RLC CHANNEL THROUGHPUT		147
ANEXO A		151
BANDAS DEFINIDAS PARA LTE		151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1: EPS - Arquitectura del sistema LTE	4
Figura II.2: Red de acceso E-UTRAN e interfaces	5
Figura II.3: Transmisor de portadora única.....	7
Figura II.4: Transmisor basado en concepto FDMA.....	7
Figura II.5: Transmisor basado en concepto multi-portadora	8
Figura II.6: Espectro correspondiente a 4 subportadoras OFDM	8
Figura II.7: Estructura de Transmisor y Receptor OFDMA	10
Figura II.8: Multiplexación de usuarios en OFDMA	11
Figura II.9: Estructura de Transmisor y Receptor SC-FDMA	14
Figura II.10: Multiplexación de usuarios con SC-FDMA.....	15
Figura II.11: Protocolos de la interfaz aire del sistema LTE	17
Figura II.12: Radio Bloque (Physical Resource Block, PRB) en trama OFDMA	19
Figura II.13: Estructura de trama tipo 1 usada en LTE FDD	20
Figura II.14: Señales de referencia primarias (RSP) y secundarias (RSS) dentro de un PRB	21
Figura II.15: Asignación de recursos del scheduler utilizando la diversidad multiusuario	27
Figura II.16: Posibles esquemas de reuso de frecuencias en LTE utilizando ICIC ..	29
Figura IV.1: Configuración de Plantilla LTE Sevilla.....	49
Figura IV.2: Mapa de Sevilla con los eNBs y tipos de terreno	50
Figura IV.3: Asignación de las fórmulas del modelo Cost-Hata según el tipo de terreno	50
Figura IV.4: Estudio 1 - Cobertura por nivel de señal de referencia recibido.....	52
Figura IV.5: Estudio 2 - Cobertura por transmisor.....	52
Figura IV.6: Estudio 3 - Zonas de solapamiento	53
Figura IV.7: PDSCH – Mejor Nivel de Señal (izq.) y C/N (dcha.). <i>Downlink</i>	55
Figura IV.8: PUSCH – Mejor Nivel de Señal (izq.) y C/N (dcha.). <i>Uplink</i>	55
Figura IV.9: Comparación de C/N en los enlaces ascendente y descendente	56

Figura IV.10: $C/(I+N)$ - PDSCH (izq.) y PUSCH (dcha.) situación pesimista	57
Figura IV.11: Mapa de Tráfico de Sevilla	58
Figura IV.12: Resultado de simulación Base.....	60
Figura IV.13: $C/(I+N)$ - PDSCH (izq.) y PUSCH (dcha.) situación realista	61
Figura IV.14: Comparación de C/N y $C/I+N$ <i>downlink</i> (Celdas y Simulación Base).....	62
Figura IV.15: Comparación de C/N y $C/I+N$ <i>uplink</i> (Celdas y Simulación Base)	62
Figura IV.16: Resultados de la Simulación Base para un usuario	64
Figura IV.17: Resultados del <i>Point Analysis</i> para un punto en el mapa.....	64
Figura V.1: Distribución del espectro para FFR1, FFR3 y estrategia ICIC.....	66
Figura V.2: <i>Delta Path Loss</i> de la zona de estudio	67
Figura V.3: ICDF de <i>Delta Path Loss</i> sobre la zona de estudio	68
Figura V.4: Comparación del PDSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR3 y FFR1	70
Figura V.5: Comparación del PUSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR3 y FFR1	70
Figura V.6: Comparación del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> en ICIC, FFR3 y FFR1 para el <i>downlink</i>	71
Figura V.7: Comparación del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> en ICIC, FFR3 y FFR1 para el <i>uplink</i>	71
Figura V.8: Carga de Tráfico de Celdas <i>Downlink</i>	83
Figura V.9: Carga de Tráfico de Celdas <i>Uplink</i>	84
Figura V.10: Características de los Radio Bearer por defecto en Atoll.....	86
Figura V.11: Asignación de Radio Bearer en la simulación 0, para ICIC, FFR3 y FFR1 en el <i>Downlink</i>	87
Figura V.12: Asignación de Radio Bearer en la simulación 0, para ICIC, FFR3 y FFR1 en el <i>Uplink</i>	87
Figura V.13: Comparación del PDSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR1, ICIC UL e ICIC DL	89
Figura V.14: Comparación del PUSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR1, ICIC UL e ICIC DL	90
Figura V.15: Comparación del PDSCH $C/(I+N)$ en ICIC y FFR1 (x2 y x3).....	93
Figura V.16: Comparación del PDSCH $C/(I+N)$ en ICIC y FFR1(x5 y x10).....	93

Figura V.17: Comparación del PUSCH C/(I+N) en ICIC y FFR1 (x2, x3, x5 y x10)	95
Figura V.18: Comparación del <i>Throughput Downlink</i> en ICIC y FFR1 (x2, x3).....	95
Figura V.19: Comparación del <i>Throughput Downlink</i> en ICIC y FFR1 (x5, x10)....	96
Figura V.20: Comparación del <i>Throughput Uplink</i> en ICIC y FFR1 (x2, x3, x5 y x10)	97
Figura V.21: Relación entre el número de RB y nivel de C/(I+N).....	101
Figura V.22: Comparación de Usuarios No conectados según densidad de usuarios. (ICIC, ICIC DL y FFR1).....	102
Figura V.23: Configuración Inicial de los Servicios: (a) FTP Download, Video Conf.; (b) VoIP, Web Browsing.....	105
Figura V.24: Configuración Inicial de los Perfiles de Usuario.....	106
Figura V.25: Comparación del PUSCH C/(I+N) en ICIC UL y FFR1(x3).....	107
Figura V.26: Comparación del PUSCH (I+N) en ICIC UL y FFR1(x3).....	107
Figura V.27: Comparación del PUSCH C en ICIC UL y FFR1(x3)	109
Figura V.28: Comparación del <i>Effective RLC Channel throughput downlink</i> para las técnicas de diversidad MIMO.	112
Figura V.29: Comparación de <i>Effective RLC Channel throughput uplink</i> para las técnicas de diversidad MIMO	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1: Valores de parámetros usados el <i>downlink</i> para cada ancho de banda de canal	13
Tabla IV.1: Estudios independientes de la carga de tráfico. (1, 2 y 3)	51
Tabla IV.2: Estudios de nivel de señal PDSCH y PUSCH. (4, 5, 6 y 7)	54
Tabla IV.3: Estudios de Calidad de señal PDSCH y PUSCH basado en tabla de celdas. (8 y 9)	57
Tabla IV.4: Estudios de Calidad de señal PDSCH y PUSCH basado en simulaciones. (10 y 11)	61
Tabla V.1: Estudio del <i>Delta Path Loss</i>	67
Tabla V.2: Estudios de $C/(I+N)$ y <i>Throughput</i> utilizando ICIC, FFR3 y FFR1	69
Tabla V.3: Probabilidad de <i>throughput</i> por porcentaje de zona de estudio	74
Tabla V.4: Relación entre la cantidad de recursos utilizados en FFR1 e ICIC para tres usuarios. (<i>Uplink</i>)	77
Tabla V.5: Distribución de usuarios en promedio según el estado de conexión para ICIC, FFR3 y FFR1	79
Tabla V.6: Distribución de usuarios por servicio para ICIC, FFR3 y FFR1	82
Tabla V.7: Estudios de $C/(I+N)$ utilizando ICIC UL e ICIC DL	88
Tabla V.8: Distribución de usuarios en promedio según el estado de conexión para ICIC, FFR1, ICIC UL e ICIC DL	90
Tabla V.9: Estudios de $C/(I+N)$ y <i>Throughput</i> utilizando ICIC y FFR1 (x2 , x3, 5 y x10)	92
Tabla V.10: Distribución de usuarios en promedio según el estado de conexión para ICIC y FFR1, empleando distintas densidades de usuario (x2, x3, x5, x10)	98
Tabla V.11: Estudios de $C/(I+N)$ e $(I+N)$ utilizando ICIC UL y FFR1 (x3)	106
Tabla V.12: Estudios de <i>throughput</i> utilizando técnicas de diversidad MIMO combinadas con ICIC	111

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el área de mayor crecimiento dentro del sector de las telecomunicaciones es el de las comunicaciones móviles, destacando particularmente el de la telefonía móvil celular, cuyo desarrollo ha llegado a tal punto que para el año 2011 ya poseía un total de 5mil millones de suscriptores en todo el mundo. Es por esto que las compañías y organizaciones asociadas se han visto en la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que permitan atender a la creciente población de usuarios que no solo aumenta en número sino también en demanda de servicios. Como consecuencia surge un nuevo estándar, introduciendo nuevas variantes en comparación a los sistemas de comunicaciones móviles previos, relacionadas con las velocidades alcanzadas y con soporte a través del protocolo IP de todos los servicios, esta nueva evolución es denominada LTE (*Long Term Evolution*) y forma parte de la cuarta generación de sistemas de comunicaciones móviles.

Al igual que la tecnología evoluciona, las instituciones educativas y los grupos de investigación han de hacer lo mismo, es por esto que surge la necesidad por parte del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, de desarrollar este proyecto, con la finalidad de poder afianzar los conocimientos teóricos sobre LTE basándose en una herramienta que es utilizada actualmente en el campo laboral, por grandes compañías como Vodafone, como lo es Atoll. Particularmente se enfoca este estudio en analizar las formas de gestión del espectro radioeléctrico así como la relación que posee con algunos de los parámetros de la red. Para lograrlo se ha estructurado este proyecto de la siguiente forma:

Inicialmente en el CAPÍTULO I se hace una breve descripción de la propuesta del proyecto, incluyendo los objetivos tanto general como los específicos que involucran, y por último se mencionan las limitaciones y los alcances por los que se rige el presente proyecto.

Seguidamente en el CAPÍTULO II se explican los conceptos y aspectos fundamentales del sistema LTE, incluyendo las posibles formas de gestión del espectro radioeléctrico que posteriormente serán aplicadas. Finalmente el capítulo termina con un breve resumen de los pasos a seguir para realizar la planificación de un sistema LTE, incluyendo algunas recomendaciones y tipos de prueba a realizar.

Posteriormente en el CAPÍTULO III se expone de forma general los pasos a seguir para evaluar el impacto que generan las distintas configuraciones de parámetros y estrategias sobre el funcionamiento de un sistema móvil celular, tomando en cuenta la etapa de planificación de la red y el uso de un *software* que facilite el estudio.

De esta forma se abre paso al CAPÍTULO IV, en el que se desarrollan y describen los procedimientos efectuados para poder planificar una red LTE con el *software* de Atoll, incluyendo los distintos tipos de estudios realizados. Una vez configurada la red, es utilizada en el CAPÍTULO V para plantear distintos escenarios que permitan entender tanto las formas como Atoll genera diversos resultados, así como evaluar el comportamiento de la red creada; comparando los resultados obtenidos al emplear los esquemas de reúso de frecuencia FFR1 y FFR3 en conjunto con la estrategia de coordinación de interferencias ICIC. Asimismo dentro de cada escenario se analiza y explica cada uno de los resultados obtenidos.

Finalmente se completa la etapa de estudios del proyecto con el CAPÍTULO VI, en el que se exponen todas las conclusiones generadas a partir de la unión de los resultados obtenidos y se cierra el capítulo con una breve mención de las posibles líneas futuras que podrían surgir a partir de este proyecto. Por último se incluyen los apéndices, cuyo contenido está relacionado con las fórmulas más importantes que sirvieron para entender los resultados generados por Atoll y que fueron empleadas por el programa a lo largo del proyecto.

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

I.1 PROPUESTA

Los sistemas de telefonía móvil emergentes en la actualidad introducen nuevas variantes en comparación a los sistemas previos, entre ellos destaca LTE, como sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación.

Entre las nuevas variantes introducidas por el sistema se encuentra la relacionada con la coordinación de la interferencia intercelular ICIC, es por esto que El Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles ha decidido estudiar el impacto de utilizar dicha estrategia y los posibles esquemas de reuso frecuencial en un sistema LTE con la herramienta de planificación y optimización de radio frecuencia Atoll.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar como el uso de diferentes estrategias de gestión del espectro radioeléctrico afecta el funcionamiento un sistema LTE a través del uso de la herramienta de planificación y optimización de redes Atoll.

I.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y ejecutar los procedimientos básicos de planificación necesarios para crear una red LTE.
- Comparar el funcionamiento del sistema LTE cuando se habilita la coordinación de interferencias ICIC y cuando se utilizan los esquemas de reuso de frecuencia FFR1 y FFR3.
- Evaluar el impacto de incrementar la densidad de usuarios de una red LTE para las estrategias de gestión del espectro ICIC, FFR1 y FFR3.

- Estudiar si existe independencia al tener habilitada la opción de ICIC en un solo enlace o en ambos simultáneamente.
- Analizar las consecuencias que se generan al aumentar los requerimientos de la relación portadora a ruido más interferencia necesaria para poder acceder a los servicios de la red.
- Comparar el funcionamiento de un sistema LTE para diferentes técnicas MIMO combinadas con la estrategia ICIC.

I.3 LIMITACIONES Y ALCANCES

I.3.1 LIMITACIONES

- En este proyecto, a pesar de que se comprendieron todos los conceptos de teoría asociados, tanto a la planificación de la red como al sistema propio LTE, los resultados obtenidos se encontraban condicionados por las ecuaciones y fórmulas configuradas internamente en el *software* de Atoll.
- Debido a que Atoll no incluye en su configuración las funcionalidades de la interfaz X2 del sistema LTE, no se pudo emplear en ningún estudio basado en la coordinación de interferencia intercelular (ICIC), la variante de esta estrategia que actúa de forma dinámica, sino que fue utilizada la versión estática aplicada por Atoll que se basa en un esquema de reuso de frecuencia denominado FFR *Time-Divided*.

I.3.2 ALCANCES

- Al momento de realizar las predicciones no se tomaron en cuenta las interferencias inter-tecnológicas que podrían existir por la presencia de otros sistemas en la zona de estudio.
- En los estudios realizados, no se tomaron en cuenta usuarios en interiores ni pérdidas por edificios u otro tipo de obstáculo.

CAPÍTULO II.

MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se explican aspectos fundamentales del sistema LTE relacionados principalmente con la red de acceso E-UTRAN y la interfaz radio. En primer lugar se describe la arquitectura del sistema, para después presentar las bases de las tecnologías a nivel físico, las cuales constituyen una de las principales diferencias en comparación a los sistemas predecesores, y posteriormente se describen los mecanismos relacionados con la gestión de recursos, pero enfocados básicamente a la técnica de gestión de interferencia ICIC.

Por último se resume brevemente los pasos a seguir para realizar la planificación de un sistema LTE, incluyendo algunas recomendaciones y tipos de prueba a realizar.

II.1 LTE (*LONG TERM EVOLUTION*)

LTE es una tecnología de redes móviles desarrollada por el 3GPP y sobre la cual se basa este proyecto, considerada como de cuarta generación. Entre las principales características que posee el sistema LTE cabe mencionar [1]:

- Está basado en conmutación de paquetes, es decir, que no tiene partes operando en conmutación de circuitos.
- Emplea las técnicas de acceso múltiple OFDMA para el *downlink* y SC-FDMA para el *uplink*.
- Ancho de banda escalable entre los valores 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz.
- Velocidades de transmisión de pico alcanzables superiores a los 100Mbps y 50Mbps en el *downlink* y *uplink* respectivamente (con modulaciones de alta eficiencia).
- Posee una mejor calidad de servicio a través de la reducción del tiempo de latencia, tanto en el plano de usuario como de control.

- Mejora la eficiencia espectral con respecto a los sistemas anteriores en un orden de 3 aproximadamente pudiendo llegar a valores de pico de 5/bits/Hz (a velocidades de 100Mbps sobre una canalización de 20MHz).
- Nueva arquitectura de la red troncal, mucho más simplificada, más “plana”.
- Red basada completamente en IP, lo que se traduce en equipos más económicos y de fácil adquisición.

II.1.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE

Una representación de la arquitectura del sistema LTE, denominado formalmente como *Evolved Packet System* (EPS), se puede observar en la Figura II.1. Está conformado por tres componentes básicos: equipo de usuario, red de acceso (E-UTRAN) y red troncal (EPC).

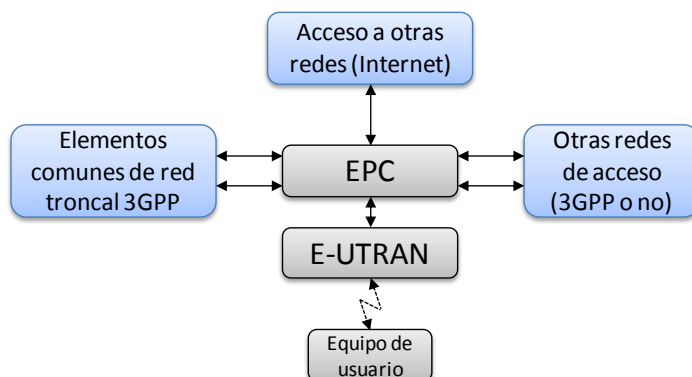


Figura II.1: EPS - Arquitectura del sistema LTE [1]

El equipo de usuario o UE (*User Equipment*) es el dispositivo empleado por el usuario para poder acceder a los servicios de la red. La conexión entre el equipo de usuario y la red de acceso se realiza a través de una interfaz radio.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC en conjunto son las encargadas de proporcionar servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuarios y redes externas como Internet, entre otras, denominados formalmente como servicios portadores EPS o *EPS Bearer Service*, cuyas prestaciones en términos de caudal de datos (*throughput*), retardos y pérdidas, pueden ser configuradas según el servicio final (videoconferencia, navegación web, etc.) al cual estén asociados.

Cabe destacar, como se muestra en la Figura II.1, la capacidad que tiene el sistema LTE de permitir el acceso a sus servicios a través de otras redes acceso sean estas 3GPP o no. [1], a pesar de que ésta posibilidad no esté incluida como parte del estudio de este proyecto.

En la Figura II.2 se puede observar la arquitectura e interfaces de la red de acceso, la cual está compuesta únicamente por la estación base denominada *evolved NodeB* (eNB), a diferencia de los sistemas móviles previos los cuales estaban compuestos por estaciones base y equipos controladores de estaciones base. Los eNBs proporcionan la conectividad entre los equipos de usuarios UE y la red troncal EPC. Además presentan tres interfaces de nombre E-UTRAN U_U , S1 y X2 que le permiten comunicarse con el resto de elementos del sistema.

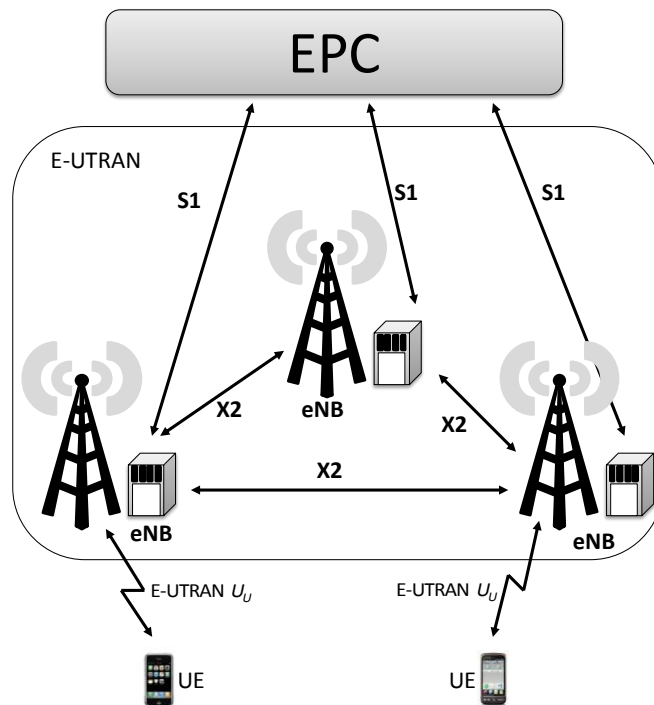


Figura II.2: Red de acceso E-UTRAN e interfaces [1]

La primera es la E-UTRAN U_U también conocido como interfaz radio LTE, permite la transferencia de información a través del canal radio en los eNBs y UEs. Todas las funciones y protocolos requeridos para efectuar el envío de datos y controlar el

funcionamiento de la interfaz radio se implementan en el eNB. [1]. La transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina servicio portador radio o *Radio Bearer* (RB). Una de las características que posee el sistema y que permite reducir el tiempo de latencia ocurre en el plano del control, en el que se hace uso de una conectividad de tipo “*always on*”, en la que cada eNB mantiene cierta información almacenada sobre todos los UE que tenga conectados (estado del equipo, servicios portadores activos, capacidades del sistema, etc.) para así mantener los servicios de E-UTRAN activos.

La segunda es una interfaz opcional que conecta a los eNBs entre sí y se denomina X2. Dicha interfaz está directamente relacionada con la gestión de los recursos radio que es una de las funciones claves de la red de acceso LTE. Los eNBs además de realizar funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, asignación dinámica de recursos radio, tanto en el *downlink* como el *uplink* (conocida como funciones de *scheduling*), control de movilidad, control de reporte de medidas de los equipos de usuario que puedan ser útiles para la gestión de recursos, etc., podrían hacer uso de la interfaz X2 para enviar los mensajes de tráfico de los usuarios cuando estos realicen un *handover*, o también mensajes de señalización con el objetivo de reducir la interferencia entre eNBs.

Por último existe la interfaz denominada S1 que conecta los eNBs con la red troncal EPC, dicha interfaz está formada a su vez por dos interfaces más de nombre S-GW (*Gateway*) y S-MME (*Mobile Management Entity*) asociadas al plano de control y al plano de usuario respectivamente.

II.1.2 TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO

Una de las principales características que poseen los sistemas de última generación, como LTE, es la tecnología que implementan a nivel físico, ya que permite utilizar de forma más eficiente los recursos radios disponibles en comparación a los sistemas previos [1]. LTE utiliza las técnicas de acceso múltiple OFDMA y SC-FDMA para

los enlaces descendente (*downlink*) y ascendente (*uplink*) respectivamente, ambas basadas en la técnica de transmisión OFDM.

II.1.2.1 Bases del Acceso Múltiple en LTE

Una transmisión de portadora única (*Single Carrier*, SC) se traduce en que toda la información está modulada y contenida en una sola portadora que ocupa una banda de frecuencia definida como se muestra en la Figura II.3, cuyas características como fase, frecuencia y amplitud pueden ser ajustadas por un transmisor que tenga las capacidades adecuadas.

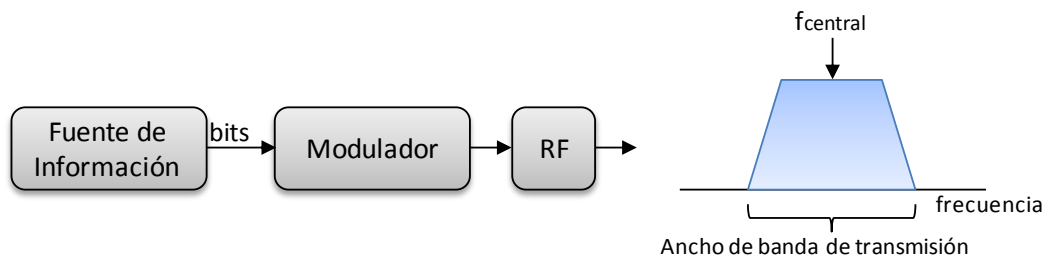


Figura II.3: Transmisor de portadora única [2]

En el concepto de FDMA, cada usuario utiliza una frecuencia portadora o subportadora distinta como se muestra en Figura II.4 con el fin de acceder al sistema de forma simultánea, dichas portadoras han de estar lo suficientemente separadas y sus formas de onda han de ser adecuadas como para no causar una excesiva interferencia entre sí [2], pero que tampoco estén demasiado separadas ya que se estaría haciendo un mal uso del espectro.

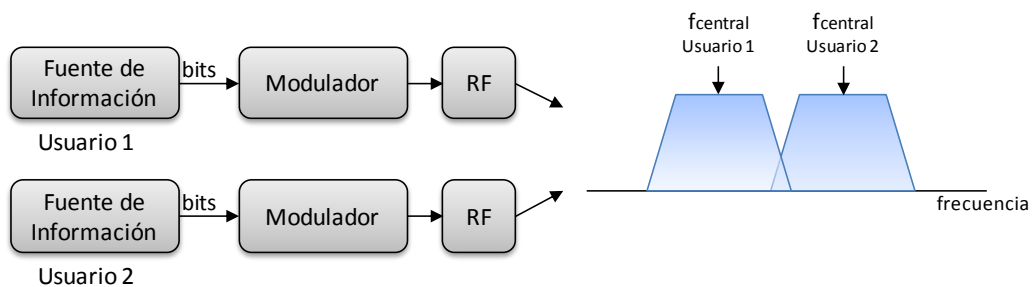


Figura II.4: Transmisor basado en concepto FDMA [2]

Por otra parte el concepto de una señal multi-portadora se muestra en la Figura II.5 en el que los bits de información son repartidos sobre las distintas subportadoras de un

mismo transmisor utilizando un banco de filtros¹ (como ejemplo) y con igual separación entre subportadoras [2].

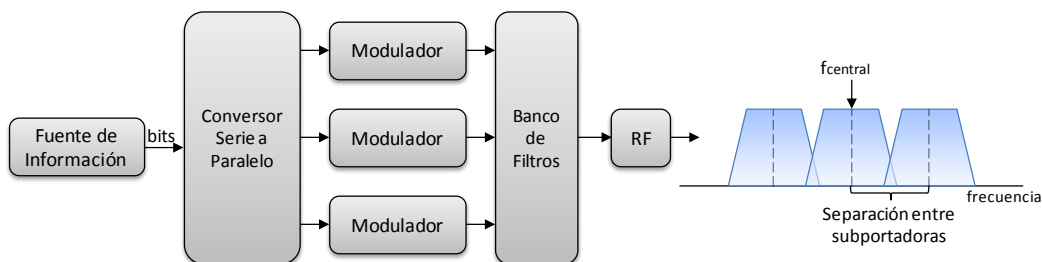
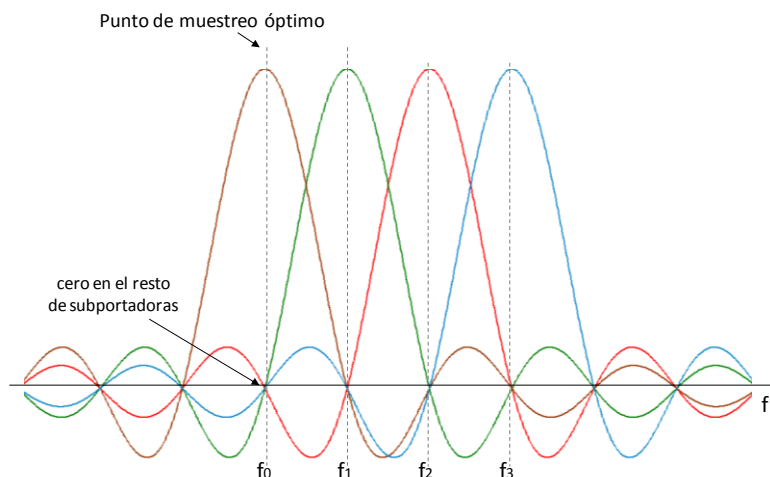


Figura II.5: Transmisor basado en concepto multi-portadora [2]

Asimismo existe la técnica de transmisión OFDM que constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora basado en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí [1]. Las propiedades de ortogonalidad permiten que a pesar de que los espectros de las subportadoras estén superpuestos, esto no impida la separación en recepción y posterior recuperación de los símbolos transmitidos. En la Figura II.6 se observa un ejemplo de una señal OFDM en frecuencia formada por 4 subportadoras y en donde se indica el punto de muestreo óptimo de una subportadora y el valor nulo del resto para este punto.



**Figura II.6: Espectro correspondiente a 4 subportadoras OFDM
Fuente: Elaboración Propia**

¹ En la práctica cuando el número de subportadoras es alto se utiliza la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) para ubicar los símbolos a transmitir en la correspondiente subportadora.

II.1.2.2 Fundamentos OFDMA

En el sistema LTE la implementación práctica de los moduladores y demoduladores se hace mediante técnicas basadas en la transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) y su operación inversa (IDFT – *Inverse DFT*) para manipular la representación de una señal entre tiempo y frecuencia según se requiera; aunque comúnmente en la implementación se utilizan sus versiones rápidas FFT y su inversa IFFT con la finalidad de acelerar el proceso de cálculo, haciendo obligatorio que el número de muestras a la entrada sea necesariamente una potencia de 2 lo cual está relacionado directamente con los anchos de banda de canalización que se puedan utilizar [2].

La técnica de acceso OFDMA es utilizada por el sistema LTE para el enlace descendente. En el esquema de la Figura II.7 se puede observar las etapas por las que atraviesa la señal en el transmisor y en el receptor. En el transmisor los bits de la señal de entrada pasan por un conversor serie-paralelo formando N flujos de información, cada flujo será mapeado posteriormente, es decir, asignado a una subportadora distinta. Posteriormente con la IFFT de N muestras se pasa la señal al dominio del tiempo, se pasa nuevamente la señal a serie y se le agrega el prefijo cíclico. Por último se convierte la señal a analógica y se transmite por el canal radio.

El motivo por el cual se agrega el prefijo cíclico es evitar la interferencia intersimbólica (ISI), ya que a pesar de que las subportadoras sean ortogonales entre ellas, estas tienen que atravesar el canal radio, sobre el cual se generan una serie de fenómenos (difracción por obstáculos, las reflexiones múltiples, etc.) que afectan a la señal según el entorno donde esté el terminal móvil receptor [1]. Por lo tanto, la señal recibida es una suma de la original junto con otras réplicas originadas por los distintos caminos de propagación existentes en el canal, cada réplica es recibida en instantes de tiempo diferentes y con amplitudes y fases distintas. Sin embargo, para suprimir la interferencia ISI es necesario asegurar que la duración del prefijo cíclico sea mayor al máximo retardo de las componentes multicamino. El mecanismo para agregar el prefijo cíclico consiste en repetir al principio de la señal las muestras

finales resultantes del proceso de modulación, lo cual resulta muy sencillo tomando en cuenta que el transmisor hace uso del IFFT, ya que según como estén ubicados los elementos a la entrada será conocida su ubicación a la salida.

El esquema del receptor también se muestra en la Figura II.7, en él se hace exactamente los mismos procedimientos pero contrarios al del transmisor. En la etapa de demapeado se utiliza un ecualizador para poder reducir los efectos de la respuesta frecuencial del canal dado que no es constante y origina que cada subportadora vea una respuesta frecuencial de canal distinta.

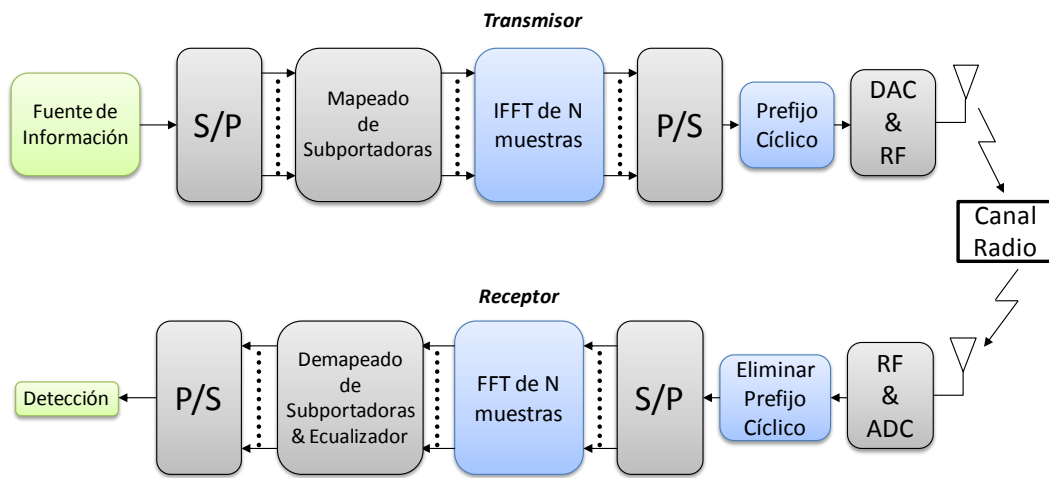


Figura II.7: Estructura de Transmisor y Receptor OFDMA [3]

La aplicación de los conceptos mencionados anteriormente son los que permiten utilizar esta técnica en el enlace descendente, en donde los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pueden pertenecer a distintos usuarios. Por lo tanto es posible acomodar varias transmisiones simultáneas pertenecientes a distintos flujos de información de cada usuario como se representa en la Figura II.8. Es importante mencionar que a pesar de que en dicho ejemplo cada usuario tiene asignado un conjunto de subportadoras contiguas, esto no necesariamente tiene porque ser así, sino que los símbolos de un usuario también podrían estar en subportadoras no contiguas [1].

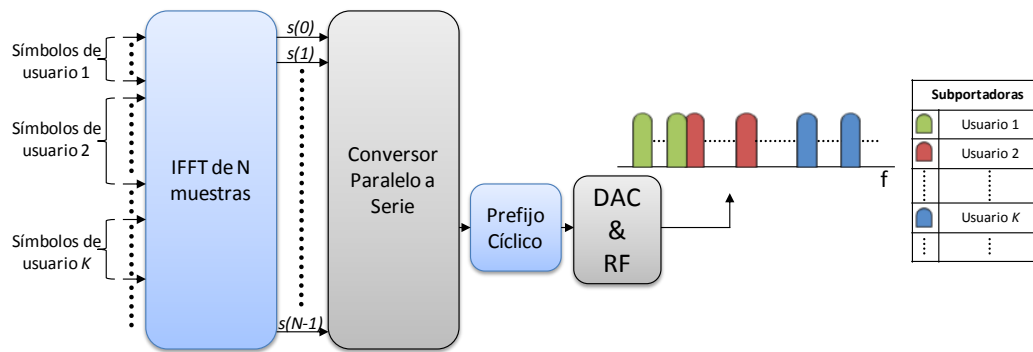


Figura II.8: Multiplexación de usuarios en OFDMA [1]

El empleo de OFDMA conlleva las siguientes ventajas según [1]:

- Diversidad multiusuario: al utilizar OFDMA la asignación de subportadoras a usuarios se realiza de forma dinámica, a través de técnicas de *scheduling*, pudiéndose modificar en períodos cortos de tiempo. Dado que el canal radio presenta desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras (independiente al usuario que las tengas asignadas) se puede intentar seleccionar para cada subportadora el usuario que presente mejor estado del canal (según la relación señal a ruido que perciba) lo que se traduce en un uso más eficiente del espectro obteniendo mayores velocidades de transmisión.
- Diversidad frecuencial: existe diversidad frecuencial dado que es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas y que estén lo suficientemente separadas como para que el estado del canal sea independiente entre ellas.
- Robustez frente a la propagación multicamino: gracias al uso del prefijo cíclico como se mencionó anteriormente, la técnica OFDMA es muy robusta frente al ISI y es posible combatir la distorsión utilizando técnicas de ecualización en el dominio frecuencial.
- Velocidad de transmisión escalable: mediante la posibilidad de asignar una cantidad mayor o menor de subportadoras a cada usuario.
- Elevada granularidad en los recursos asignables: como la banda total está subdividida en un conjunto de subportadoras de banda estrecha que se asignan de forma dinámica a los usuarios, se dispone de una alta granularidad al poder

asignar más o menos recursos a cada uno, lo cual es útil para acomodar servicios con distintos requerimientos de calidad.

- Sencillez de implementación en el dominio digital: gracias a la posibilidad de emplear chips que efectúan los procesos de FFT/IFFT de forma rápida.

De igual forma la técnica OFDMA presenta una serie desventajas también:

- Relación entre potencia instantánea y potencia media elevada: es uno de los mayores inconvenientes, ya que representa un problema de linealidad para los amplificadores de potencia, limitando su eficiencia e incrementando su coste.
- Sensibilidad antes los errores de frecuencia: dicha sensibilidad proviene del concepto de ortogonalidad entre las subportadoras, ya que pueden existir desplazamientos de frecuencia causado por factores como la estabilidad de los osciladores o el efecto Doppler dado por los movimientos de los terminales, entre otros, lo que se traduce en una pérdida de ortogonalidad y por consiguiente la aparición de interferencia entre subportadoras.
- Reducción de la velocidad de transmisión: dado que al agregar un prefijo cíclico para combatir el ISI se está incrementando la duración del símbolo OFDM.

II.1.2.3 Parámetros de OFDMA empleados por LTE

A continuación se presentan los parámetros OFDMA definidos en el contexto del enlace descendente de LTE basándose en [1]:

La separación entre subportadoras es de $\Delta f = 15kHz$, aunque también existe una posibilidad de que sea $7.5kHz$ pero enfocado a transmisiones *multicast* en redes iso-frecuenciales (SFN, *Single Frequency Network*).

Las subportadoras son agrupadas en un bloque de 12 subportadoras contiguas, con un ancho de banda resultante de $180kHz$, representando la mínima unidad asignable a un usuario en el dominio frecuencial. Por lo tanto el número de subportadoras que ocupa una portadora LTE en el *downlink* es $N_S = 12N_B + 1$, es decir, la suma del

número de bloques de 12 subportadoras (N_B) utilizados más la subportadora central que no es utilizada por ninguno de los bloques debido a la posibilidad de presentar una alta interferencia causada por el oscilador local en recepción.

La flexibilidad en el ancho de banda de transmisión ocupado viene dado por el número de N_B utilizados de forma tal que $BW_{TX} = (12N_B + 1) \cdot \Delta f$, el cual está relacionado a su vez con el ancho de canal LTE como se muestra en la Tabla II.1. En todos los casos el porcentaje de banda ocupado es del 90% excepto en el caso de 1.4MHz que es el 78%. Asimismo la selección de una configuración u otra en términos de número de bloques empleados se controla mediante el número de muestras N usado en los procesos de IFFT/FFT y sus correspondientes frecuencias de muestreo dado por $f_m = N \cdot \Delta f$ como se aprecia en la misma Tabla II.1.

$BW_{canal}(MHz)$	1,4	3	5	10	15	20
N_B	6	15	25	50	75	100
$BW_{TX}(MHz)$	1.095	2.715	4.515	9.015	13.515	18.015
$N_{IFFT/FFT}$	128	256	512	1024	1536	2048
$f_m(MHz)$	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72

Tabla II.1: Valores de parámetros usados el *downlink* para cada ancho de banda de canal

Por último cabe destacar que la duración del prefijo cíclico varía dependiendo del tipo de trama que se esté utilizando en caso de emplear el modo TDD, o de la cantidad de símbolos por slot para el modo FDD. Las modulaciones que se pueden emplear en este enlace son QPSK, 16QAM y 64QAM.

II.1.2.4 Fundamentos SC-FDMA

SC-FDMA es una técnica de modulación híbrida que combina las ventajas de los sistemas OFDMA, como la flexibilidad en la elección de las subportadoras y la robustez ante la propagación multicamino, con una relación PAPR (Potencia instantánea-potencia media, *Peak to Average Power Ratio*) mucho menor en comparación a la del sistema OFDMA nativo y que es característico de las modulaciones de portadora única. Esta combinación de características fue la razón

para elegirla como técnica de acceso múltiple en el enlace ascendente del sistema LTE, especialmente la última ya que al ser una técnica utilizada en el terminal móvil no es posible requerir amplificadores que consuman mucha potencia y que como consecuencia reduzcan la duración de la batería del equipo.

El esquema del transmisor y receptor se muestra en la Figura II.9, en ella se observan que las etapas por las que tiene que pasar la señal son muy similares al caso OFDMA, la única diferencia que existe (en el caso del transmisor) es la adición de una DFT de K muestras con el propósito de precodificar los K símbolos a transmitir antes de realizar la transmisión OFDM utilizando una IDFT de N muestras. Dado que $N > K$, el resto de entradas de la IDFT que no se encuentren ocupadas por la información a transmitir tendrán un valor de cero, el resultado de este proceso es una señal de portadora única (*single carrier*) que presenta propiedades de PAPR mejor que las señales multiportadora y cuyo ancho de banda de valor $BW_{SC} = K\Delta f = K \cdot fm/N$ es regulable simplemente modificando el valor de K , lo que permite generar la característica de flexibilidad en la banda asignada. Además escogiendo las entradas de la IDFT sobre la cual se introducen los K símbolos se puede variar el rango de frecuencias sobre la cual se posicionará la señal resultante. Análogamente sucede lo mismo con el receptor.

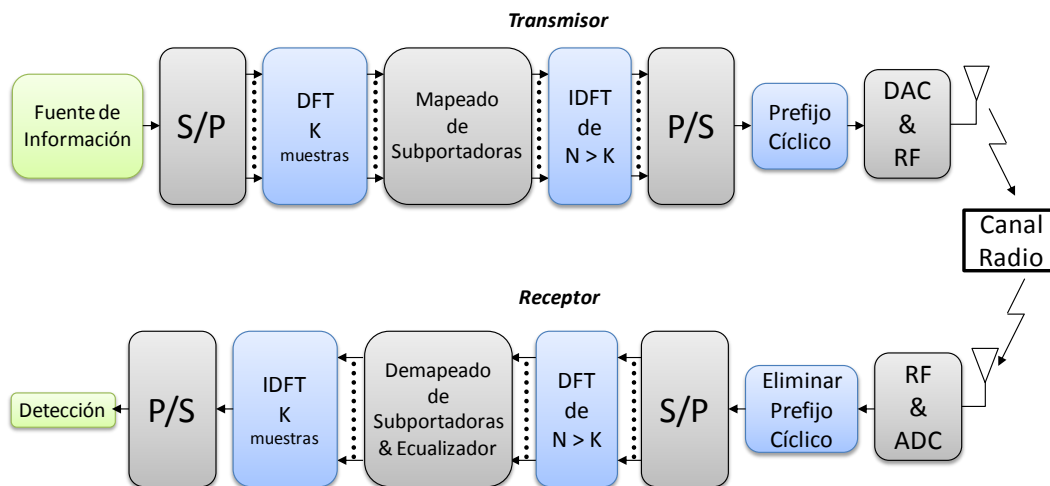


Figura II.9: Estructura de Transmisor y Receptor SC-FDMA [3]

Al igual que en OFDMA el valor de la muestras N de los IDFT/DFT suele ser una potencia de dos, por lo que se puede utilizar la versión rápida IFFT/FFT respectivamente.

Es importante mencionar que se pueden colocar las K muestras a la salida del DFT (después de haber sido mapeadas) en posiciones no contiguas a la entrada del IDFT, generando así un esquema que se denomina SC-FDMA distribuido. A pesar de que existe esta posibilidad, la misma no se utiliza. En cambio, el esquema utilizado en LTE se conoce como localizado en el que las K muestras se ubican en posiciones contiguas sobre el IDFT, esto se debe a que, a diferencia del anterior, este esquema es menos sensible a los errores de frecuencia [1].

El mecanismo de multiplexación de las transmisiones de diferentes usuarios se puede observar en la Figura II.10, en donde cada usuario ubica sus distintas K muestras en posiciones distintas a la entrada del IDFT de modo que ambas transmisiones ocupen bandas frecuenciales diferentes con un valor de ancho de banda igual a $K_{usuario}\Delta f$.

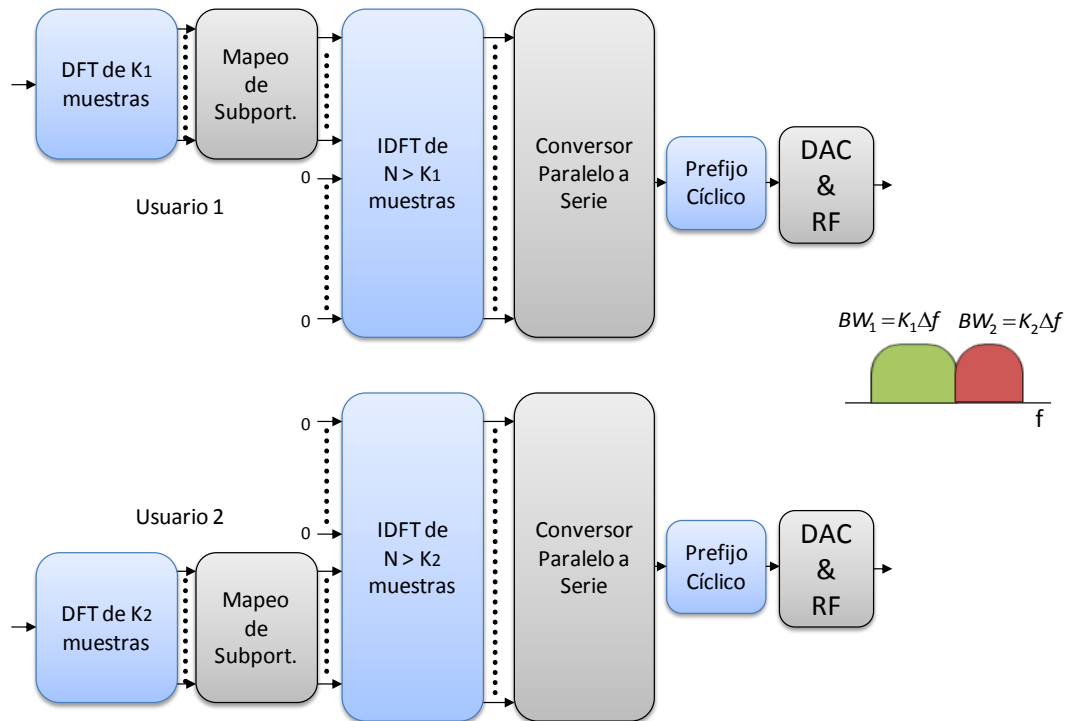


Figura II.10: Multiplexación de usuarios con SC-FDMA [1]

II.1.2.5 Parámetros SC-FDMA empleados por LTE

En general los parámetros SC-FDMA son muy similares a los usados en el enlace descendente. La separación entre subportadoras es $\Delta f = 15\text{kHz}$ agrupadas en bloques de 12 subportadoras cada uno. Estos bloques pueden ser asignados de forma flexible a los diferentes usuarios con la única limitación que las subportadoras asignadas a un único usuario han de ser contiguas.

A diferencia del enlace descendente, el número de subportadoras disponibles estará dado por $N_S = 12N_B$ ya que no se deja de usar la subportadora central gracias a la precodificación basada en la DFT que hace que la posible interferencia del oscilador local quede dispersada en toda la banda ocupada. En relación a los valores de tiempo de símbolo y prefijo cíclico son los mismos que en el *downlink* [1]. Las modulaciones en el enlace ascendente pueden ser QPSK, 16 QAM y 64QAM (para terminales de categoría 5).

II.1.2.6 MIMO

El estándar LTE implementa la técnica de múltiples antenas en recepción y transmisión denominada MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) con el objetivo de mejorar las prestaciones del enlace. Los modos de operación de la técnica dependen del tratamiento que se le dé a la información a transmitir por las diversas antenas:

- Diversidad en transmisión: consiste en transmitir el mismo flujo de información por las múltiples antenas. Busca mejorar la relación señal a ruido de recepción, aprovechando los múltiples caminos de propagación (independientes entre sí) del entorno.
- Multiplexación espacial: consiste en transmitir distintos flujos de información por las antenas. Busca incrementar la velocidad de transmisión percibida, aunque depende de qué tan dispersivo sea el canal.
- Beamforming: consiste en utilizar antenas inteligentes para lograr una conformación de haz buscando eliminar las interferencias.

II.1.3 INTERFAZ RADIO

A través de la interfaz aire se realiza la interconexión y el envío de mensajes tanto de tráfico como de señalización entre el equipo del usuario y la red de acceso formada por los *evolved NodeB* (eNB).

Cada eNB se conecta a la red troncal a través de la interfaz S1, la cual a su vez está conformada por dos interfaces más, una dedicada a las funciones de control y la otra dedicada a las funciones de transferencias de los paquetes de usuario.

En la Figura II.11 se observa la torre de protocolos de la interfaz aire, la cual está dividida en: plano de usuario, para el envío de paquetes IP cuyo destino o fuente es el terminal móvil y el plano de control o señalización para los mensajes de control.

En el plano de usuario, el envío de los paquetes IP de los usuarios a través de la interfaz aire se gestiona gracias al establecimiento de los denominados servicios portadores radio o *Radio Bearer* (RB). Cada RB tiene asociado un perfil de calidad de servicio (QoS) que ha de ser garantizado por la torre de protocolos.

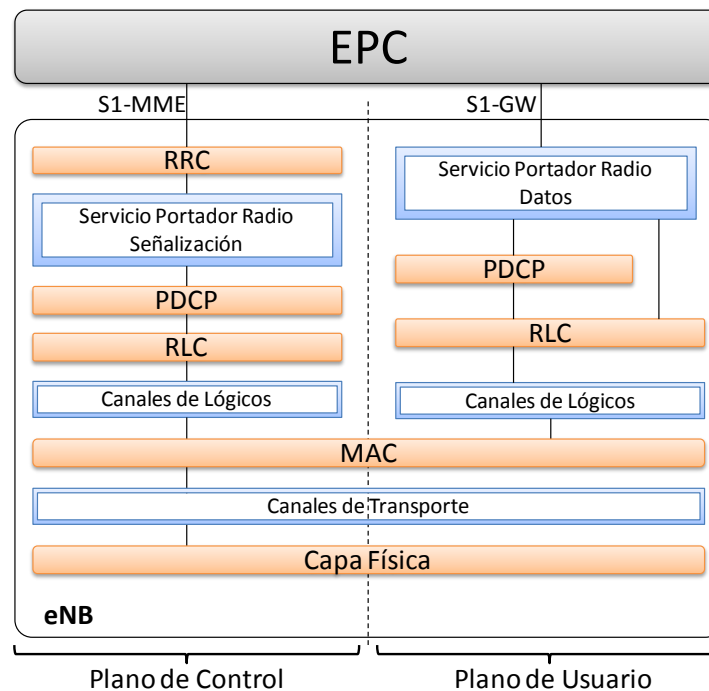


Figura II.11: Protocolos de la interfaz aire del sistema LTE
Fuente: Elaboración Propia

Entre los protocolos que sustentan el envío de paquetes se encuentran los de la capa física y los de la capa de enlace que a su vez se desglosa en varios [1]:

- **PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*)**: con funciones de compresión de cabecera de paquetes IP y de entrega/recepción ordenada de paquetes IP desde hacia las capas superiores.
- **RLC (*Radio Link Control*)**: establece un enlace fiable por la interfaz aire.
- **MAC (*Medium Access Control*)**: permite un acceso ordenado de los diferentes usuarios al medio de transmisión.
- **Capa física**: proporciona el mecanismo de transmisión/recepción a través del espectro radioeléctrico.

Por su parte en el plano de control se utiliza adicionalmente el protocolo RRC (*Radio Resource Control*) encargado de funciones como la gestión de la conexión a nivel radio entre el terminal móvil y el eNB, configuración de los servicios portadores y el envío de mensajes relacionados con la movilidad por/para el terminal móvil.

Asimismo en la Figura II.11 se puede observar que la interrelación entre los diferentes protocolos se hace a través de diversos tipos de canales. Los canales lógicos ubicados entre la capa RLC y MAC se encargan de describir el tipo información ya sea de control o de usuario, a transmitir por la interfaz aire. Los canales de transporte ubicados entre la capa MAC y la física describen de qué forma y con qué características se transmitirá la información a través de la interfaz aire. Por último los canales físicos ubicados en la capa física indican los mecanismos físicos de transmisión/recepción sobre la interfaz radio.

II.1.3.1 Capa Física

La capa física de la interfaz aire del sistema LTE está basada en el uso de las técnicas de acceso múltiple OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente. Está pensada para operar en bandas altas de UHF (*Ultra High Frequency*), por encima de los 450MHz y hasta los 3,5GHz, en el ANEXO A se

puede observar una completa descripción de la configuración de cada una de las bandas del estándar.

A nivel de capa física se define el concepto de bloque de recursos físico (PRB, *Physical Resource Block*), como el mínimo elemento de información que puede ser asignado a un terminal móvil [1]. Un PRB está formado por un bloque de 12 subportadoras contiguas que en conjunto ocupan un ancho de banda de 180kHz y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la duración del prefijo cíclico utilizado. En el dominio temporal un PRB dura 0.5ms correspondiente a la duración de un *slot* dentro de una trama LTE. Una representación gráfica de un PRB en una señal OFDMA se puede observar en la Figura II.12 donde cada color representa a un usuario y la asignación de PRBs es variable con el tiempo.

En el dominio temporal los recursos físicos del sistema LTE se distribuyen a través de estructuras de trama. A pesar de que existan diferentes opciones, a continuación solamente se va a describir la correspondiente con el modo FDD denominada trama tipo 1 y sobre la cual se basa este proyecto.

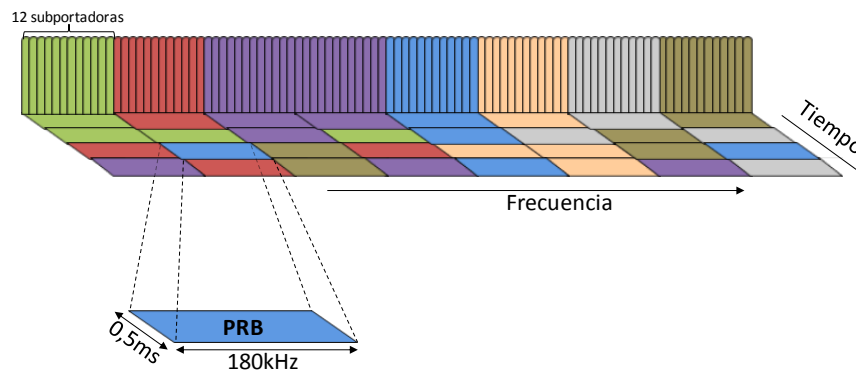


Figura II.12: Radio Bloque (Physical Resource Block, PRB) en trama OFDMA [1]

La estructura de trama 1 se observa en la Figura II.13 aplica para ambos enlaces descendente y ascendente, además la estructura es capaz de soportar tanto *half* como *full* dúplex FDD. En esta estructura el eje temporal se divide en tramas de 10ms, compuestas a su vez por 10 subtramas de duración 1ms y cada subtrama está formada por 2 ranuras temporales o *slots* (TS) de 0.5ms. En cada TS se pueden transmitir 6 o 7

símbolos OFDMA, cada uno con una duración de $66.7\mu\text{s}$. El prefijo cíclico (CP) a utilizar depende del número de símbolos por subtrama, en caso de 7 símbolos el CP dura $4.7\mu\text{s}$ excepto para el primer símbolo que dura $5.2\mu\text{s}$ y se le define como prefijo cíclico normal. En cambio, para el caso de que se utilicen 6 símbolos [1], el CP tiene una longitud de $16.67\mu\text{s}$ y se le denomina prefijo cíclico largo, es normalmente utilizado cuando las celdas son muy grandes.

Los flujos de información de los usuarios del sistema son ubicados por el gestor de recursos radio, ubicado en el eNB y denominado *scheduler*, en una estructura de frecuencia-tiempo definida como *Scheduling Resource Block* (SRB), formada por dos PRB, es decir, que tienen 180KHz de ancho y un intervalo de tiempo de duración igual a una subtrama (1ms) de largo..

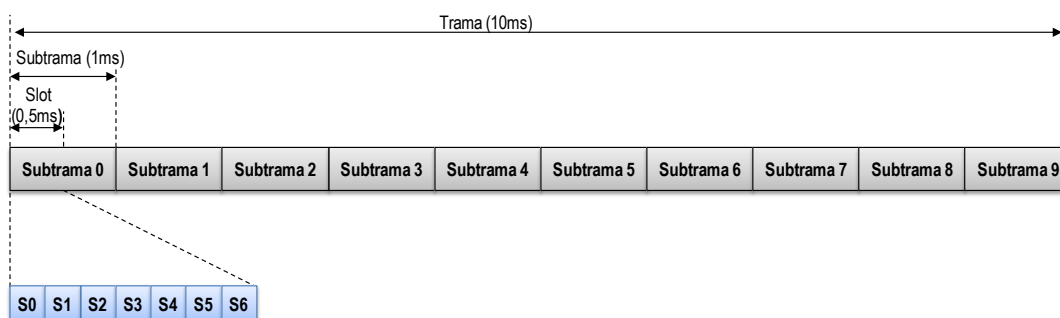


Figura II.13: Estructura de trama tipo 1 usada en LTE FDD [1]

II.1.3.2 Señales y Canales Físicos en el enlace descendente

Para poder facilitar la demodulación y detección de las señales moduladas OFDMA el sistema LTE utiliza el siguiente conjunto de señales físicas y de sincronización [1]:

- Señales de Referencia (RS): también conocidas como símbolos pilotos, se utilizan para realizar medidas sobre la calidad del enlace descendente, implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial, así como para estimar la respuesta impulsional del canal² para la demodulación y detección

² En las especificaciones del estándar LTE no se establece un mecanismo concreto para realizar la estimación, por lo tanto este aspecto ha de ser establecido por cada fabricante.

coherente. Existen dos grupos de señales de referencia, las primarias (RSP) y las secundarias (RSS), ambas se ubican en determinados recursos elementales dentro de un PRB como se observa en la Figura II.14. Las señales secundarias se utilizan en caso de que las condiciones del canal así lo requieran.

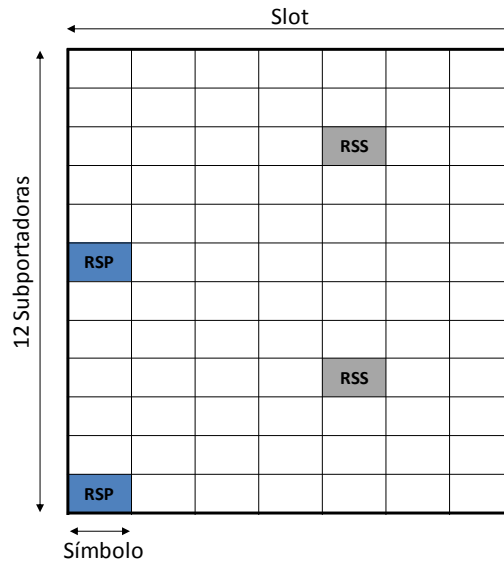


Figura II.14: Señales de referencia primarias (RSP) y secundarias (RSS) dentro de un PRB [1]

- Señal de Sincronización (SCH): se utiliza para facilitar los procesos de sincronización temporal, está conformada por una señal primaria que permite la sincronización a nivel de subtrama y una señal secundaria para sincronizarse a nivel de trama. Ambas utilizan metodologías de correlación temporal con secuencias de referencias almacenadas en el receptor.

En las especificaciones del estándar LTE están definidas 504 secuencias de señales de referencia obtenidas a partir de secuencias Gold³ de longitud 31. Estas 504 secuencias únicas, denominadas *Physical Cell ID*, están agrupadas en 168 grupos de 3 secuencias, donde cada grupo identifica a una estación base eNB distinta. Las 3 secuencias de cada grupo se utilizan para identificar a cada uno de los tres posibles sectores de una eNB.

³ Las secuencias Gold son secuencias binarias que presentan buenas propiedades de autocorrelación.

Además de las señales físicas, también existen una serie de canales físicos que utiliza el sistema para poder describir los mecanismos físicos de transmisión de la información. Se dividen en canales físicos de tráfico y de control dependiendo de la información que han de transportar. Cabe destacar que a diferencia de sistemas previos, en el sistema LTE no contempla el uso de canales de tráfico dedicados, sino compartidos. A continuación se describe únicamente los canales físicos utilizados en desarrollo del proyecto:

- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH): canal de tráfico que normalmente transmite información de usuario a pesar de que también puede transportar información de aviso (*paging*) y de radiodifusión que no sea imprescindible para que el terminal se enganche. No es un canal dedicado, por lo que solo se le asigna a un usuario cuando este tenga algo que recibir dependiendo de las decisiones de asignación de recursos que efectúe el *scheduling* en el enlace descendente. Emplea esquemas de modulación QPSK, 16 QAM y 64 QAM y en general utiliza turbo códigos de tasa 1/3 para la codificación de canal. Utiliza mecanismos de retransmisión híbrida (HARQ).
- Physical Downlink Control Channel (PDCCH): canal de control que transmite información sobre los recursos asignados en el enlace descendente al PDSCH.

II.1.3.3 Señales y Canales Físicos en el enlace ascendente.

De igual forma existen dos tipos de señales de referencia en el enlace ascendente [1]:

- DeModulation Reference Signal (DM-RS): son señales utilizadas en la estimación de la respuesta impulsional del canal⁴ necesarias para permitir la demodulación coherente en el enlace ascendente. Están asociadas a la transmisión de datos o información de control en el *uplink*. En el caso de

⁴ Al igual en el enlace descendente en las especificaciones del estándar LTE no se establece un mecanismo concreto para realizar la estimación, por lo tanto este aspecto ha de ser establecido por cada fabricante.

transmisión de datos las señales se ubican en el cuarto símbolo SC-FDMA si se utiliza un prefijo cíclico normal y en el tercer símbolo si se utiliza prefijo cíclico corto; ocupa el mismo número de subportadoras que las ocupadas por los datos de usuario. En el caso de transmisión de control su ubicación no es fija y depende del formato utilizado.

- *Sounding Reference Signals (SRS)*: son señales de referencia destinadas al sondeo de la calidad del canal de transmisión. A diferencia de la DM-RS no está relacionado a la transmisión de datos y/o control del enlace ascendente y se utilizan principalmente para facilitar la toma de decisión de los algoritmos de *scheduling* a través de de reporte sobre el estado del canal en el dominio de la frecuencia, aunque también puede utilizarse para mejorar los mecanismos de control de potencia. Se ubican en el último símbolo de las subtramas indicadas mediante mensajes de radiodifusión.

Asimismo, al igual que en el *downlink*, también existen los canales físicos para el *uplink*, y se clasifican en canales de tráfico compartido y canales de control. A continuación se describe únicamente los canales físicos utilizados a lo largo del proyecto:

- *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*: es el canal de tráfico empleado para transmitir la información de usuario. El número de subtramas y la cantidad de subportadoras disponibles para cada usuario dependerá de la asignación realizada por el *scheduler* en el enlace ascendente, el cual se encuentra en la eNB. Emplea esquemas de modulación QPSK, 16 QAM y 64 QAM⁵, así como turbo códigos de tasa 1/3 para la codificación de canal y mecanismos de retransmisión híbrida (H-ARQ).
- *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*: canal de control utilizado para realizar peticiones de asignación de recursos, enviar reconocimientos

⁵ Para emplear 64 QAM el terminal del usuario ha de ser de categoría 5.

(ACK/NACK) para el mecanismo de transmisión híbrido HARQ del enlace descendente. Además se utiliza para transmitir información acerca de la calidad del canal (*Channel Quality Indicator* – CQI) utilizado para optimizar los procesos de asignación de recursos en el *downlink*.

II.1.4 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO Y DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

La gestión de los recursos radio y del espectro radioeléctrico representa uno de los aspectos más importantes para los operadores de cualquier sistema de comunicaciones móviles, en primer lugar dado que una gestión eficiente puede permitir ofrecer a los abonados diversos tipos de servicio con QoS adecuadas y en segundo lugar, debido al alto costo que implica utilizar una porción del espectro radioeléctrico.

Dadas estas condiciones es necesario incorporar a la red una serie de funciones que permitan controlar y gestionar los recursos radios de la manera más eficiente posible. A este conjunto de funciones se les denomina *Radio Resource Management* (RRM).

En el estándar LTE⁶ están definidas una serie de funciones y conceptos RRM, especificando las interfaces y señales necesarias para la ejecución de dichas funciones, mas no especifica estrategias ni algoritmos para implementarlas, quedando de esta forma a decisión del fabricante de los productos la implementación de las estrategias, aportando así a las operadoras un grado de flexibilidad para escoger los algoritmos que mejor se adapten a sus redes. A continuación se presenta únicamente las funciones de gestión de recursos radio más trascendentes en el desarrollo de este proyecto.

⁶ En el capítulo 16 de las especificaciones del 3GPP TS 23.300 v8.11.0 “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description”

II.1.4.1 Control de Admisión Radio (RAC)

El *Radio Admission Control* (RAC) se encarga de decidir si una nueva petición de servicio para un usuario es aceptada o no. El criterio para la toma de decisiones está basado en la comprobación de los QoS requeridos por los servicios, es decir, para aceptar una nueva petición ha de garantizarse que se puedan cumplir con los requerimientos de QoS tanto de la nueva conexión como las conexiones ya establecidas. En caso negativo se deniega el servicio, pero en caso positivo se ejecutan los mecanismos necesarios como el establecimiento de un nuevo servicio portador radio o *Radio Bearer*.

Los modelos de QoS definidos en LTE están asociados directamente al servicio portador o EPS *bearer* (comprende la comunicación desde el equipo del usuario hasta la red troncal), se divide entre servicio portador radio RB (entre el UE y el eNB) y otros tipos de servicios portadores a lo largo de la red. Entre los parámetros que definen un EPS *bearer* están: QCI (*Qos Class Identifier*) que determina el comportamiento del plano de usuario del servicio portador, ARP (*Allocation and Retention Priority*) que se utiliza como un indicador de prioridad en los procesos⁷ asociados al EPS, MBR/GBR (*Maximum/Guaranteed Bit Rate*) máxima y mínima tasa de transferencia en bits/s por EPS, y valores de tasas agregadas según el perfil del suscriptor [1].

II.1.4.2 Control de Servicios Portadores Radio (RBC)

La función de *Radio Bearer Control* (RBC) se encarga de establecer el RB correspondiente a un servicio basándose en los requerimientos de QoS una vez este haya sido aceptado por el RAC. Además tienen la función de mantener la QoS del servicio a lo largo de la sesión y la liberación de RBs.

⁷ Procesos de establecimiento, modificación y desconexión.

II.1.4.3 Scheduling de Paquetes y Estrategias

La función de *scheduling* de paquetes en LTE reside en el eNB para ambos enlaces y consiste en asignar los recursos radio de forma dinámica, indicando qué usuarios van a transmitir, en cuáles recursos de la interfaz radio y con qué esquema de modulación y codificación [1].

El mínimo recurso que es capaz de asignar el *scheduler* a un usuario está formado por un bloque de 180kHz en una subtrama que dura 1ms y se denomina *Scheduling Resource Block* (SRB), esta granularidad que presenta el sistema LTE le permite adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del canal radio.

En el dominio temporal el *scheduler* es capaz de aprovechar la denominada diversidad multiusuario, que se basa en el concepto de que cada usuario percibe el mismo canal radio con distintos niveles de calidad, por lo tanto es posible asignar el canal en cada subtrama al usuario que presente la mejor calidad de canal, con lo que se lograría aprovechar mejor los recursos radio.

Asimismo, con respecto al dominio frecuencial, es posible utilizar el mismo concepto mencionado anteriormente, en donde teniendo en cuenta los desvanecimientos selectivos en frecuencia, se le asignaría el bloque frecuencial al usuario que sufra menos el impacto de las variaciones del canal. Un ejemplo de la asignación temporal/frecuencial de recursos para dos usuarios se puede observar en la Figura II.15, en donde se seleccionan los recursos al usuario según como este perciba el canal.

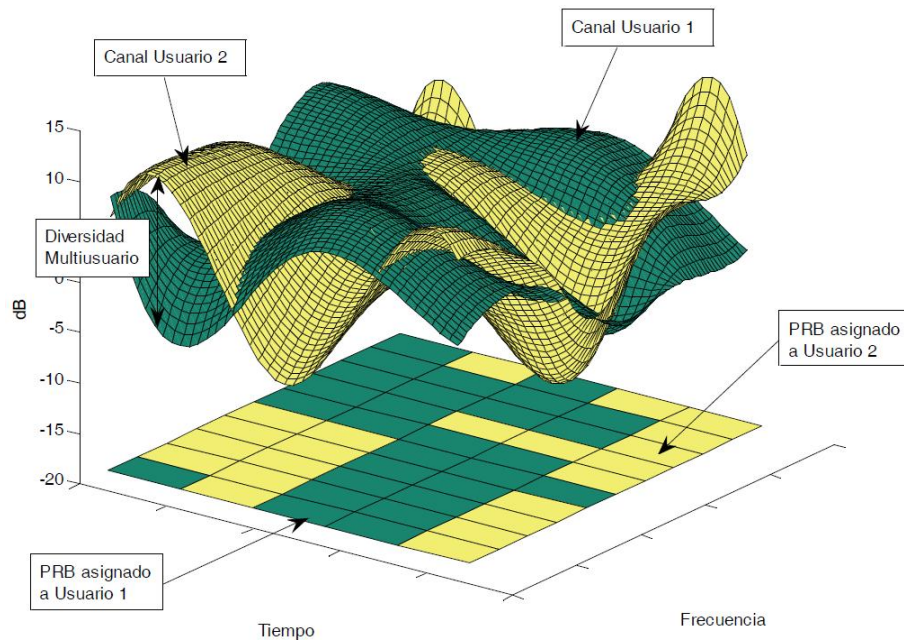


Figura II.15: Asignación de recursos del scheduler utilizando la diversidad multiusuario [1]

Las estrategias sobre los criterios y el funcionamiento que ha de efectuar el *scheduler* para decidir qué usuarios transmiten y en que recursos es uno de los aspectos que no están definidos en el estándar, dichas estrategias son mejor conocidas como estrategias de *scheduling*. A continuación se mencionan las dos más importantes:

- Round Robin (RR): Asigna cíclicamente el canal a los usuarios sin tomar en cuenta las condiciones de canal percibida por ellos. Se considera una estrategia justa.
- Proportional Fair (PF): En esta estrategia que trata de obtener la capacidad máxima mientras al mismo tiempo hace un reparto justo de los recursos entre los usuarios. Esto se logra asignando a cada un flujo de usuario un nivel de prioridad inversamente proporcional al que sería su consumo de recursos en caso de que sea elegido.

II.1.4.4 Inter-Cell Interference Coordination

En los sistemas celulares se pueden clasificar dos tipos de interferencia, intracelular cuando es causada por las transmisiones de/para los usuarios dentro de una misma celda, e intercelular cuando afecta a transmisiones de/para usuarios de otras celdas.

El sistema LTE, gracias a la función de *scheduling*, no presenta interferencia intracelular, ya que el *scheduler* define cuales PRBs serán utilizados para cada usuario en cada subtrama evitando de esta forma colisiones. Sin embargo, en LTE si existe la interferencia intercelular, la cual ocurre cuando usuarios de distintas celdas tienen asignado el mismo PRB de la misma subtrama; el impacto es mayor a medida que las celdas donde ocurra esta situación sean más cercanas. Dicha interferencia es capaz de causar los siguientes efectos:

- Disminución de la SINR, dado que se incrementa el valor de interferencia. Para combatirlo es necesario seleccionar esquemas de modulación y codificación más robustos y por ende de menor eficiencia espectral, reduciendo así la cantidad de bits por PRB.
- Reducción de la duración de la batería del terminal dada la necesidad de aumentar la potencia de transmisión en el *uplink* para lograr la correcta comunicación.
- Reducción de las capacidades de la celda, dado el incremento de mensajes de señalización debido a retransmisiones HARQ.

InterCell Interference Coordination (ICIC) es una estrategia de gestión de interferencias, cuya funcionalidad reside en el eNB y su objetivo es decidir un conjunto de restricciones y preferencias sobre el uso y la potencias de transmisión por PRB para cada eNB. Existen dos formas de realizar la gestión, la primera es a través de una coordinación dinámica en la que es necesario que los eNBs interactúen entre sí, intercambiando indicadores de interferencia⁸ a través de la interfaz X2, lo que sin embargo se traduciría en un incremento de los mensajes de señalización que han de cursar por la red. La segunda es a través de una gestión estática en donde a cada eNB se le asigna durante la etapa de despliegue y planificación de la red las restricciones y

⁸ Estos indicadores de interferencia están definidos en las especificaciones del 3GPP TS 36.423 v8.8.9, “Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), X2 application protocol (X2AP)”.

preferencias de transmisión asociadas principalmente al establecimiento de factores de reuso de frecuencias, y que cuya implementación no implica ningún tipo de aumento de la carga de la red por señalización.

La realización de este proyecto está basado en la gestión de interferencias de forma estática por lo que a continuación se describen las distintas posibilidades que existen de hacer dicha gestión. En la Figura II.16 se puede observar los posibles esquemas de reuso de frecuencias.

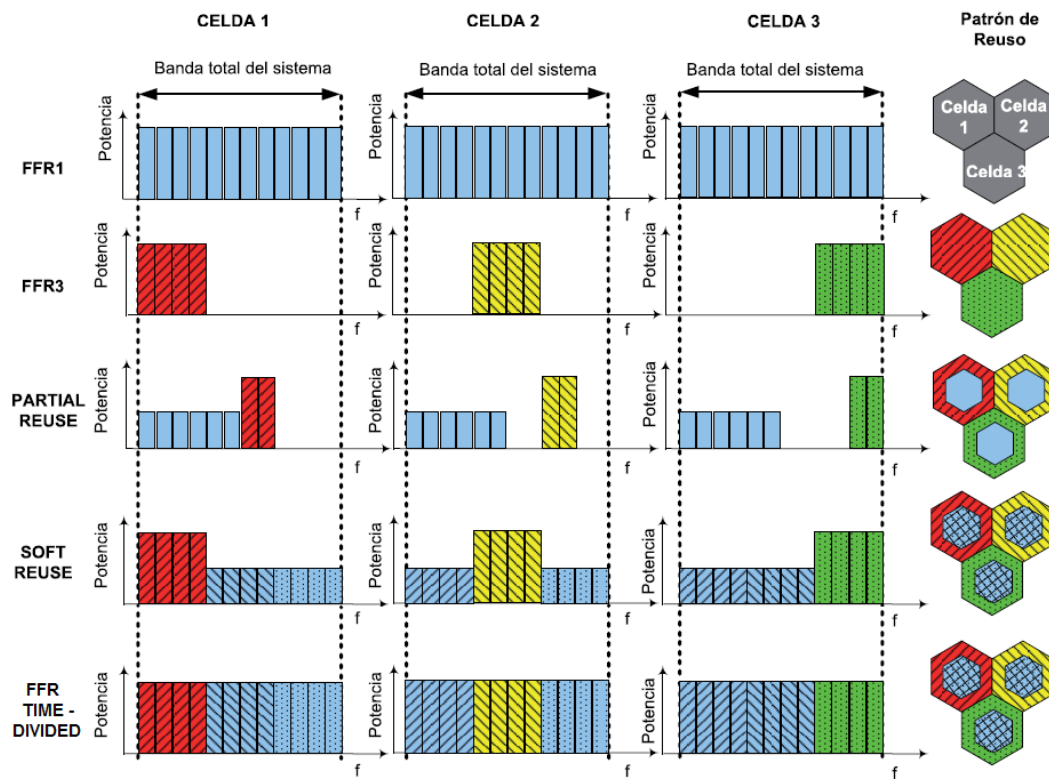


Figura II.16: Posibles esquemas de reuso de frecuencias en LTE utilizando ICIC [1]

Inicialmente se ilustra el *Fractional Frequency Reuse 1* (FFR1), donde todos los PRBs están disponibles para todas las celdas. Posteriormente se observa el caso de reuso 3 (FFR3), donde los PRBs están divididos en 3 grupos y cada grupo es asignado a una celda dentro de un grupo de 3 celdas, este esquema a pesar de que reduce notablemente las interferencias, implica una reducción drástica de las capacidades de cada celda y podría no garantizar la calidad de servicio de las

conexiones establecidas en términos de velocidades de pico y *throughput* obtenido por los usuarios [1]. Asimismo se muestra la estrategia *Partial Reuse*, que resulta de combinar las primeras dos estrategias, en donde todas las celdas utilizan la misma fracción de la banda en el centro de la celda, pero en el borde cada una emplea una fracción de la banda distinta con una potencia superior. Después se ilustra la estrategia *Soft Reuse* que es similar a la de *Partial Reuse* con la variante de que se hace reuso de toda la banda en el centro de la celda y, al igual que en el caso anterior, para los usuarios en el borde de la celda, cada celda utiliza una fracción de banda distinta con una potencia superior. Finalmente se muestra la estrategia FFR *Time-Divided*, que es similar al concepto de *Soft Reuse* pero en él se busca la disminución de interferencias solamente utilizando una fracción de banda distinta en intervalos de tiempo distintos, pero no utiliza un nivel de potencia superior al de centro de celda.

II.2 PLANIFICACIÓN RADIO FRECUENCIAL (RF) DE REDES LTE

La planificación RF de las redes celulares, como LTE, se define como el proceso mediante el cual se asignan frecuencias, se ubican emplazamientos y se configuran parámetros de un sistema de comunicaciones inalámbrico con el fin de proporcionar la cobertura y capacidad necesaria para satisfacer los requisitos de calidad mínima de los servicios ofrecidos.

Esta planificación se enfoca principalmente en los aspectos de cobertura y capacidad. La cobertura está asociada a la región geográfica sobre la que el sistema es capaz de proveer una señal lo suficientemente fuerte como para poder establecer una sesión de datos o una llamada, mientras que la capacidad está relacionada con la cantidad de usuarios que puede soportar el sistema simultáneamente. En LTE la capacidad y la cobertura son indirectamente proporcionales. Para mejorar la cobertura es necesario sacrificar capacidad y viceversa.

Sin embargo, no son los únicos aspectos ya que también se tiene que establecer la red en función de parámetros como la QoS, las frecuencias, equipos a utilizar, costo de

implementación, entre otros. Para lograrlo es necesario realizar una serie de pasos como por ejemplo: investigar sobre las características del terreno y crear una base de datos con la información geográfica recolectada, analizar la población a dar cobertura, y realizar simulaciones y análisis utilizando las herramientas y escenarios de propagación adecuados [4].

En líneas generales el proceso de planificación RF en LTE puede seccionarse en cuatro fases:

II.2.1 FASE 1: BALANCE DE POTENCIAS INICIAL.

En esta primera fase se realiza un balance de potencias empleando modelos de propagación estadísticos como COST-231 Hata, Erceg-Greenstein, entre otros, para estimar el área de cobertura en cada emplazamiento. Estos modelos de propagación estadísticos no toman en consideración los efectos del terreno y tienen adaptaciones a sus fórmulas según el tipo de entorno (Rural, Urbano, Suburbano, etc.). Sin embargo a pesar de lo simplista que pueda parecer este estudio, es suficiente para determinar de manera aproximada la cantidad de emplazamientos necesarios.

Para las celdas LTE, las antenas normalmente se sitúan a 45m de altura en zonas rurales y a 30 metros en zonas urbanas. Típicamente en un despliegue macrocelular las estaciones bases son ubicadas de forma hexagonal y a una distancia de 1500 metros entre sí [4] .

II.2.2 FASE 2: SIMULACIONES DEL ENTORNO.

Esta fase normalmente está basada en el uso de herramientas de planificación de radio frecuencia (como el *software* de Atoll) donde se estudian representaciones más realistas del entorno, y se incluyen los efectos de las características del terreno, de forma tal que, mediante simulaciones, se puedan tomar decisiones sobre cambiar la ubicación o agregar alguna estación base, modificar los tipos de antena, agregar más sectores, etc.

En esta etapa se definen parámetros como:

- Plan de frecuencias: a utilizar en la red.
- Técnicas de Diversidad (MIMO): es necesario definir la cantidad de antenas que han de utilizarse en búsqueda de aprovechar los beneficios de la técnica MIMO.
- Modelo de propagación: se definen los escenarios de propagación para modelar un canal con propagación multicamino para MIMO, así como el modelo de propagación estadístico basados en la frecuencia y en y el tipo de entorno (rural, urbano, etc.).
- Physical Cell ID: se asignan los identificadores a cada una de las estaciones base utilizando diferentes algoritmos.
- Tipos de celda: se evalúan los tipos de celda a utilizar en la red (macrocelas, microcelas, etc.).
- Parámetros de antenas: se definen aspectos como tipos de antena e inclinación (*downtilt*).
- Asignación de vecinos: se definen la lista de vecinos para cada celda.
- Mapas de tráfico: se busca representar el tráfico esperado en la zona de estudio.

Asimismo también se han de realizar las simulaciones pertinentes para poder analizar las diferentes señales que describan el rendimiento de la red como RSSI, RSCP, E_c/N_0 , $C/(I+N)$, BLER, entre otras.

II.2.3 FASE 3: PUESTA A PUNTO Y OPTIMIZACIÓN

En esta tercera fase se efectúan estudios que permitan la optimización en los detalles de la planificación. Se realiza un test denominado *Drive Test* o también conocido como *Continuous Wave (CW) test*, considerado esencial para el proceso de planificación RF y previo al despliegue de la red celular. Un CW ha de realizarse para examinar los niveles de señal en el área de estudio (sea en interiores, exteriores o en vehículos) y consiste en ubicar una antena transmisora en el lugar de interés (futuro emplazamiento) configurada para transmitir una señal portadora no modulada en el

canal de frecuencia escogido, mientras un vehículo con un equipo receptor recolecta y registra los niveles de señal recibida [4].

Posteriormente se realiza la denominada puesta a punto del modelo o *Model Tuning*, en la que los valores registrados en el CW se estudian para extraer un factor que será incluido en el modelo de propagación seleccionado previamente. La optimización del modelo se realiza usando varios algoritmos de optimización y adaptación de curvas pertenecientes a los propietarios de la herramienta de planificación. Una vez finalizado se obtendrá un modelo del canal más preciso y real.

Por último con estas optimizaciones se realizan nuevamente los estudios de la fase 2 para observar el impacto que tiene sobre el esquema general original planteado y analizar si será necesario efectuar alguna modificación.

II.2.4 FASE 4: OPTIMIZACIÓN POST-DESPLIEGUE.

Una vez realizado el despliegue se ha de realizar una continua optimización de la planificación de radio frecuencia de la red para incluir cualquier cambio en el entorno o satisfacer requisitos adicionales de los servicios (en cobertura o capacidad). En esta fase se efectúa el denominado *Optimization Drive*, similar al CW, solo que esta vez es necesario que la red se encuentre operativa. Por lo tanto la señal de datos modulada es transmitida desde la eNB y capturada y registrada por el equipo receptor para después analizar el rendimiento a través de la medición de distintos parámetros como niveles de señales de referencia, tasas de errores de bloque (BLER), etc.

Al igual que en la fase anterior, los resultados de estas mediciones permiten decidir añadir nuevos emplazamientos o modificaciones de la configuración de las ya existentes.

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe, de forma general, los pasos necesarios para evaluar el impacto que generan distintas configuraciones de parámetros y estrategias sobre el rendimiento de un sistema móvil celular, tomando en cuenta la etapa de planificación de la red y el uso de un *software* de planificación de radio frecuencias apropiado.

III.1 ETAPA DE INVESTIGACIÓN

Esta primera etapa está asociada con la investigación de todos los aspectos teóricos relacionados con el sistema celular a estudiar, así como la comprensión del funcionamiento de la herramienta/*software* a utilizar, ya sea basándose en manuales propios del programa o en proyectos anteriores que hayan sido elaborados empleando dicha herramienta, facilitando de esta forma la familiarización con las funcionalidades y posibilidades ofrecidas por el *software*.

III.2 PLANIFICACIÓN DE RED

La etapa de planificación de red consiste en determinar todos los elementos asociados a una planificación de radio frecuencias según la tecnología que se vaya a utilizar (potencias, número de estaciones base, etc.). Se puede partir de alguna planificación realizada en un estudio anterior, adaptando los parámetros necesarios en caso de que no se haya utilizado el mismo *software*.

Asimismo se puede partir de un proyecto nuevo, para lo cual se requiere hacer una serie de cálculos de balance de potencias para cada enlace, cuyos resultados dependen de parámetros como el modelo de propagación utilizado, la frecuencia de trabajo, ancho de banda del canal, ganancia de las antenas, entre otros. Estos cálculos permiten definir el número de estaciones a utilizar y los niveles de potencia requeridos en cada enlace. De la misma forma, para cualquier tipo de *software* que se utilice, es necesario poseer información sobre el terreno a estudiar como los mapas de

cartografía, mapas del tipo de terreno, además de información asociada al tráfico de usuarios del terreno que se esté estudiando.

A partir de esta base, el siguiente paso es configurar los elementos de la red utilizando los resultados previos obtenidos, logrando así definir la ubicación de las bases, características de los transmisores, número de sectores y repetidoras, etc.

III.3 EVALUACIÓN Y CONFIGURACIÓN INICIAL DE LA RED

Una vez planificada la red a estudiar, es necesario realizar estudios de cobertura por nivel de señal los cuales permiten evaluar las condiciones iniciales de propagación para ambos enlaces, cuya configuración podría variar según el *software* utilizado. Los resultados de estos estudios servirán de referencia para comparar con aquellos que se obtengan al agregarse una mayor cantidad de factores como la planificación de frecuencias, el tráfico, estrategias de gestión de recursos, tipos de servicios, tipos de usuarios, entre otros.

A continuación se realiza la asignación de vecinos y configuración de elementos básicos según el tipo de tecnología utilizada, por ejemplo definir el número de TRXs (GSM/GRPS/EDGE), realizar la asignación de frecuencias (GSM/GPRS/EDGE, WIMAX y LTE), de preámbulo (WIMAX) o de identificador de celda (LTE).

III.4 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA RED

En esta última etapa se realizan estudios que permiten evaluar el rendimiento del sistema, y están relacionados directamente con los mapas y/o carga de tráfico que se defina para la red. Por lo tanto dependiendo del parámetro que se quiera estudiar para ver el impacto que genera su variación/modificación, será necesario hacer uso de las herramientas que proporcione el *software* utilizado, y según la tecnología a utilizar se podrán realizar los diferentes tipos de estudio, entre los más importantes se podrían mencionar aquellos relacionados con el nivel de portadora a ruido, portadora a ruido más interferencia, y los que indiquen el *throughput* máximo alcanzable sobre las zonas a estudiar.

CAPÍTULO IV.

ESTUDIOS PREVIOS

En este capítulo se desarrolla y describe el procedimiento realizado para poder planificar una red LTE en el *software* de Atoll. Primero se explican las investigaciones llevadas a cabo en conjunto con los conceptos y mecanismos manejados por Atoll, utilizados para el desarrollo de todo el proyecto. Posteriormente se explican los pasos seguidos para crear la red, incluyendo los diferentes tipos de estudios ejecutados, tanto independientes como dependientes de tráfico, con la finalidad de evaluar el estado de la red y mencionando además algunas de las posibilidades del modelado de tráfico en el *software*. Por último se describe una prueba realizada con el objetivo de analizar los resultados que se obtienen al utilizar dos opciones distintas de Atoll, a pesar de que estén basadas en la misma fuente de tráfico.

Una vez desarrollada la red, se utiliza como base para plantear diferentes escenarios, evaluando el impacto de algunas estrategias de gestión de recursos del espectro radio eléctrico, descritos en el siguiente capítulo.

IV.1 INVESTIGACIÓN INICIAL

En primer lugar se realizó un estudio completo sobre el estándar LTE, basándose en la literatura existente más reciente, con el propósito de tener una visión global del funcionamiento del sistema, entender la importancia de cada una de las partes que lo conforman y familiarizarse con los conceptos y mecanismos que en cada una de ellas se efectúa; tomando especial interés en la red de acceso E-UTRAN y las secciones relacionadas con el tema de gestión del espectro radioeléctrico que describe funcionalidades como la coordinación de interferencias ICIC sobre la cual se basa este proyecto.

Posteriormente se investigó acerca de los aspectos más importantes que han de tomarse en cuenta a la hora de realizar la planificación de la red radio de un sistema LTE, de forma tal que se pudiera entender una serie de conceptos considerados por los diseñadores de redes radio al momento de realizar la planificación de la red, así como también poder tener alguna idea de cuáles deberían ser las capacidades que ha de tener una herramienta de planificación radio como lo es Atoll.

Después, dentro de la etapa de investigación, se realizaron una serie de prácticas de planificación de redes proporcionadas por el grupo de investigaciones en comunicaciones móviles (GRCM – Grup de Recerca en Comunicacions Mòbils) sobre tecnologías como GSM y UMTS con el fin de trabajar con la herramienta Atoll y conocer sus distintas funcionalidades. Por último se procedió a manipular la herramienta, pero esta vez basándose en la tecnología LTE, y con la información encontrada en los manuales de Atoll se realizaron un conjunto de estudios para poder comprender los mecanismos y criterios que emplea Atoll a la hora realizar sus cálculos. Por lo tanto, fue necesario entender las definiciones manejadas por este *software*, así como los procedimientos que realiza, por lo que a continuación se muestra una recopilación de los aspectos y definiciones más importantes utilizadas a lo largo del proyecto.

IV.1.1 DEFINICIONES DE ATOLL

- **Plantilla (*Station Template*):** en ella se establecen una serie de parámetros de las eNB, de forma que al agregar nuevas estaciones todas sean configuradas según la plantilla seleccionada.
- **Emplazamiento (*Site*):** es el punto geográfico donde uno o más transmisores están ubicados.
- **Celda (*Cell*):** hace referencia a las características del canal RF asociado a un transmisor.
- **Estación base (*Base Station*):** hace referencia al emplazamiento y sus transmisores en conjunto con sus antenas, equipos asociados y celdas.

- **TMA:** *Tower-Mounted Amplifier* o también conocido como amplificador de bajo ruido.
- **Zona de Cómputo (*Computation Zone*):** es usada para definir el área donde Atoll realiza los cálculos. A la hora de efectuar los cálculos toma en consideración las estaciones base tanto externas como internas a la zona de cómputo, siempre y cuando estas afecten los resultados dentro de la zona.
- **Transparencia (*Transparency*):** es un parámetro de Atoll, aplicable tanto en mapas como en predicciones que permite disminuir o aumentar su visibilidad.
- **Usuario (*User*):** término general aplicable para un suscriptor, terminal y receptor.
- **Suscriptor:** usuarios con coordenadas geográficas fijas.
- **Móvil (*Mobile*):** usuarios generados y distribuidos durante simulaciones. Estos usuarios poseen, entre otros parámetros, servicios definidos, tipos de terminal, y tipos de movilidad asignados durante la simulación.
- **Radio Bearer (RB):** un esquema de modulación/codificación (MCS) usado para cargar los datos a través del canal.
- **Umbral de selección de RB (*Bearer Selection Thresholds*):** un radio *bearer* particular es seleccionado para la transferencia de datos en un determinado píxel del mapa si la relación $C/(I+N)$ para dicho píxel es superior al valor del umbral de selección que hace referencia.
- **Tipo de terreno (*Clutter Classes*):** describe el tipo de terreno según su uso.
- **Cargas de tráfico (*Traffic Loads*):** son porcentajes de las tramas *uplink* y *downlink* asignadas para el tráfico ascendente y descendente respectivamente. Puede ser definido por el usuario o como un resultado de las simulaciones de Monte Carlo.
- **Carga de tráfico máxima (*Max traffic load*):** es el tráfico en el enlace descendente o ascendente que no puede ser excedido. Este límite es tomado en cuenta durante las simulaciones de Monte Carlo. Si el tráfico de la celda está

limitado por este valor, entonces la celda no podrá tener una carga de tráfico superior a este máximo.

- **Lista de suscriptores (*Subscriber List*):** gracias a un modulo de LTE es posible modelar una distribución fija de usuarios en una red utilizando la lista de suscriptores.
- **Algoritmo de Monte Carlo:** algoritmo empleado para generar la distribución de usuarios para cada simulación.
- ***Generator Initialisation*:** valor ubicado dentro de las propiedades de las simulaciones, que permite definir la semilla a partir de la cual se genera la distribución de usuarios y valor de *shadowing* en las simulaciones.
- **Servicios (*Services*):** son diversos servicios disponibles para los usuarios, pueden ser de tipo voz o de tipo datos.
- **Tipo de movilidad (*Mobility Type*):** en LTE la información acerca de la movilidad del receptor es requerida para determinar la selección de los umbrales de *bearer* y las gráficas de calidad (*quality graphs*) a utilizar proveniente del equipo de recepción definido para el terminal o celda. Móviles usados a altas velocidades y a bajas velocidades no tienen las mismas características de calidad. Los requisitos de $C/(I+N)$ para los diferentes radio *bearers* dependen en gran medida de la velocidad de los móviles.
- **Tipo de terminal (*Terminal Type*):** son las variedades de terminales que pueden ser utilizados en la red.
- **Perfil de usuario (*User Profile*):** modela el comportamiento de diferentes categorías de usuarios. Cada perfil es definido por una lista de servicios que a su vez está definida por el terminal utilizado, las llamadas por hora, y la duración (para llamadas tipo voz) o el volumen ascendente y descendente (para llamadas tipo datos).

- **Interferencia Co-canal (*Co-channel interference*):** las celdas que utilizan las mismas frecuencias se denominan celdas co-canales, y la interferencia que causan los usuarios de una celda sobre las otras celdas co-canales se denomina interferencias co-canal.
- **Interferencia de Canal Adyacente (*Adjacent-channel interference*):** es otro tipo de interferencia que resulta como consecuencia de filtros imperfectos de los receptores, ya que permiten a las frecuencias vecinas interferir con la frecuencia usada por el canal en cuestión.
- ***Uplink Noise Rise*:** es una medida de la interferencia presente en el *uplink* con respecto al ruido del mismo enlace $((I + N)/N)$. La razón por la cual en Atoll se representa a la interferencia en términos de incremento en vez de factor de carga (*load factor* en %) es que el factor de carga varía casi exponencialmente con el incremento de la interferencia.
- ***ICIC UL Noise Rise*:** es el *uplink noise rise* de la parte de la trama LTE que usa una fracción del ancho de banda de canal para aplicar la estrategia ICIC. Es utilizado solamente cuando la celda tiene habilitada la opción de *Static UL*. Puede ser definido por el usuario o como resultado de las simulaciones de Monte Carlo.
- ***Max UL Noise Rise*:** es el límite superior en ambos valores de *noise rise*, es decir, el *UL noise rise* y el *ICIC UL noise rise*. Es usado para el control durante las simulaciones de Monte Carlo. Este parámetro representa la máxima interferencia tolerable que una celda puede soportar en el enlace ascendente.
- ***Schedulers*:** son los encargados de efectuar la selección de usuarios para la asignación de recursos y su administración según las clases de QoS de los servicios que estén siendo usados por los usuarios elegidos.
- **Número máximo de usuarios (*Max number of users*):** indica el número máximo de usuarios conectados simultáneamente que es capaz de soportar la celda.

- **Peak RLC Throughput:** es el máximo *throughput* bruto de la capa RLC (usuario o canal) que puede ser logrado en una determinada localidad usando el *bearer* más alto disponible. Este *throughput* no toma en cuenta los efectos de retransmisión debido a errores, ni la codificación y encriptación de las capas superiores.
- **Effective RLC Throughput:** es el *throughput* neto de la capa RLC (usuario o canal) que puede ser logrado en una determinada localidad usando el *bearer* más alto disponible calculado, teniendo en cuenta la reducción de velocidad dada por retransmisiones debido a errores.
- **Application Throughput:** es el *throughput* de la capa aplicación (usuario o canal) que puede lograrse en una determinada localidad usando el *bearer* más alto disponible calculado, teniendo en cuenta la reducción de velocidad dada por información de cabecera PDU/SDU, relleno, cifrado, codificación y otros tipos de *overhead*.
- **Aggregate Throughput:** es la suma del *Peak*, *Effective* o *Application Throughput* de todos los usuarios, puede definirse según la dirección del enlace, *site*, celda o tipo de servicio.
- **Point Analysis:** es una herramienta de Atoll que permite realizar: estudios de recepción o interferencia a lo largo del perfil del terreno entre un transmisor y un usuario, y evaluar los niveles de señales recibidas por distintos transmisores en un determinado punto.
- **Physical cell ID:** es un entero del 0 al 503. Los *physical cell IDs* están definidos en las especificaciones del 3GPP. Existen 504 identificadores únicos de la capa física. Los *physical cell IDs* están agrupados en 168 grupos de *cell ID* únicos (llamados SSS IDs en Atoll), cada grupo contiene 3 identidades únicas (denominadas PSS IDs en Atoll). Un SSS ID es entonces único y está definido por un número entre 0 y 167, y un PSS ID es definido por un número del 0 al 2.

Cada señal de referencia de la celda transmite una secuencia pseudo-aleatoria correspondiente con el *physical cell ID* que tenga.

- **Margen RSRP:** establece un margen de histéresis entre la zona de cobertura de la celda servidora y las celdas vecinas. Utilizado en el cálculo de celdas vecinas.
- **AFP (*Automatic Frequency Planner*):** permite a los ingenieros radio a la hora de diseñar redes LTE configurar automáticamente parámetros como canales de frecuencias y *physical cell IDs*.
- ***Frequency Block*:** es la unidad mínima asignable en el dominio de la frecuencia (180kHz), puede estar formada por 12 subportadoras de 15kHz ó 24 de 7,5kHz.
- **Recurso Elemental (*Resource Block/Resource Element*):** es la unidad mínima de recurso asignable. 1 *frequency block* por 1 *slot*.
- ***Scheduler Resource Block (SRB)*:** es la unidad mínima asignable por el *scheduler* compuesta por 1 *frequency block* por 1 subtrama (2 *slots*), es decir, dos PRBs enlazados en tiempo.
- **ICIC (*Inter-Cell Interference Coordination*)** es un método para mejorar la calidad de la señal en el borde de las celdas, a través del uso de diferentes frecuencias o *resource blocks*, para la asignación de recursos en celdas que representen una posible interferencia entre sí. Existen dos categorías de técnicas de coordinación de interferencias usadas en los sistemas OFDMA dinámica y estática.
- ***Static ICIC using Fractional Frequency Reuse (FFR)*:** el reuso fraccional de frecuencia estático es realizado a través de una planificación fraccional de frecuencia. Las fracciones del ancho de banda de un canal son asignadas a diferentes sectores para ser usados en los bordes de la celda según el valor de PSS ID (0, 1 o 2) de cada celda. La asignación no cambia en el tiempo y las mismas fracciones/partes del canal son usadas por los sectores.

- **ICIC Ratio (DL):** se puede establecer el porcentaje del total del tráfico descendente que corresponde con la parte ICIC de la trama. Por ejemplo, si el *downlink traffic load* es 80%, y se selecciona un *ICIC ratio* de 50%, significa que 40% del tráfico *downlink* está en la parte ICIC de la trama, mientras que el otro 40% está en la parte no ICIC. Puede ser definida por el usuario o como un resultado de las simulaciones de Monte Carlo.
- **ICIC Delta Path Loss Threshold:** Es la diferencia máxima en dB entre las pérdidas de propagación entre el segundo y el mejor servidor a ser consideradas en el borde de la celda. Los terminales en los bordes de la celda son servidos por la parte ICIC de la trama LTE, es decir, la parte de la trama que utiliza una fracción del ancho de banda del canal.

IV.1.2 MODELADO DE TRÁFICO EN ATOLL.

Para poder realizar predicciones de calidad de la señal, las cuales son dependientes de tráfico, la herramienta Atoll ofrece la posibilidad de representar la carga que presenta la red a través de dos formas, la primera es utilizando valores definidos en la tabla de celdas y la segunda a través de simulaciones de Monte Carlo.

IV.1.2.1 Tráfico por Tabla de Celdas (Cells Table)

En caso de que los estudios estén basados en la tabla de celdas, a la hora de hacer los cálculos es necesario que estén definidos los siguientes campos de la tabla:

- *Traffic Load DL* (Carga de tráfico descendente).
- *ICIC Ratio* (Relación entre tráfico ICIC y tráfico total).
- *UL noise rise* (Incremento de ruido ascendente).
- *ICIC UL noise rise* (Incremento de ruido ICIC ascendente).

A pesar de que también exista el campo *Traffic load* (UL) para indicar la carga del enlace ascendente, este parámetro no es utilizado en los cálculos de las predicciones, y sólo se utiliza como referencia.

IV.1.2.2 Tráfico por Simulaciones

Por otro lado, en caso de que el tráfico se determine utilizando simulaciones, Atoll efectúa los siguientes pasos para crear cada una de ellas:

1. Generación y distribución de usuarios

A partir de datos de tráfico, que se obtienen de los mapas de tráfico o de la lista de suscriptores que estén definidos en el proyecto, Atoll genera una distribución de usuarios utilizando el algoritmo de Monte Carlo y pondera dicha distribución a través de una distribución de Poisson.

A cada uno de los móviles generados durante la simulación se le asigna un servicio, tipo de movilidad y tipo de terminal de acuerdo al perfil de usuario que se le haya asignado. Se determina un estado de transmisión de acuerdo a las probabilidades de actividad definidas según el perfil usuario y el servicio asignado. Dicho estado es de suma importancia ya que afecta directamente los siguientes pasos del proceso de simulación como la gestión de recursos radio y el nivel de interferencia que se genere en la red.

La posición geográfica de cada móvil es determinada de forma aleatoria en caso de que la simulación esté basada en los mapas de tráfico, por el contrario en caso de estar basadas en la lista de suscriptores, la posición geográfica de cada suscriptor ya estaría definida (esta última opción no es utilizada durante el proyecto).

2. Determinación del mejor servidor

Atoll determina cuál es el mejor transmisor para cada móvil de acuerdo a la celda de la que perciba el nivel de señal de referencia recibida más alto.

3. Cálculos en el *downlink*

En esta etapa se realizan los cálculos de las señales de referencia, PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) y PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) C/(I+N), así como otros canales físicos. También se efectúa la determinación del mejor *bearer* disponible para el PDSCH C/(I+N), asignación de recursos (RRM), y cálculos de *throughput* de usuario.

En caso de que la celda soporte ICIC DL, en este paso se realizan los cálculos de interferencias basados en las probabilidades de colisión entre las fracciones de ancho de banda de canal que utilicen todas las celdas (tanto ICIC como no-ICIC).

4. Cálculos en el *uplink*

Análogamente al paso anterior, se realizan los cálculos de PUSCH & PUCCH $C/(I+N)$, determinación del mejor *bearer* disponible para el PUSCH & PUCCH $C/(I+N)$, control de potencia y asignación de ancho de banda en el *uplink*, asignación de recursos (RRM), actualización de los valores de *noise rise* para las celdas y cálculo de *throughput* de usuario.

De igual forma se realizan, si la celda tiene activada la opción de ICIC UL, los cálculos de interferencias, los cuales se basarán en las probabilidades de colisión entre las fracciones de ancho de banda de canal que utilicen las diferentes celdas.

Durante el control del *uplink noise rise*, si el máximo *uplink noise rise* (establecido en las propiedades de la celda) es superior al valor actual de la celda, entonces el límite máximo de $C/(I+N)$ del canal PUSCH de sus celdas vecinas es incrementado por esta misma diferencia. Esto permite a los usuarios servidos por las celdas vecinas transmitir a niveles de potencia superiores, lo que se traduce en que podrían crear mayor interferencia. Contrariamente, si el máximo *uplink noise rise* es menor que el valor actual para una celda, el límite máximo de $C/(I+N)$ del canal PUSCH es disminuido por esta diferencia. Esto trae como consecuencia que los usuarios servidos por celdas vecinas transmitan a potencias inferiores, es decir, que son forzados a crear menos interferencia. Esta característica puede derivar en el incremento o reducción del número de usuarios servidos por las celdas vecinas en el enlace ascendente.

5. Asignación de Recursos Radio y Cálculos de carga de celda

Atoll utiliza algoritmos inteligentes de *scheduling* para realizar la administración de los recursos radio. El *scheduler* ejecuta las siguientes acciones:

- a. Determina el número total de recursos en cada celda.

- b. Selecciona los primeros N usuarios generados en el primer paso, donde N es el número máximo de usuarios (*Max Number of Users*) definido en las propiedades de la celda.
- c. Ordena a los usuarios en orden decreciente según la prioridad del servicio que estén utilizando.
- d. Asigna los recursos necesarios para satisfacer la demanda mínima de *throughput*, comenzando desde el primer usuario (con la prioridad de servicio más alta) hasta el último.
- e. En caso de que aún queden recursos disponibles después de la asignación anterior, entonces se asignan recursos a los usuarios que tengan la máxima demanda de *throughput* de acuerdo al algoritmo de *scheduling* utilizado.

Asimismo entre las múltiples opciones que ofrece Atoll sobre las simulaciones, se encuentra la posibilidad de limitar la carga máxima de tráfico por celda en ambos enlaces y definir un factor de escala global que permite aumentar la densidad de usuarios, sin alterar los parámetros ni los mapas de tráfico. Además se incluye también la opción de definir el inicializador del generador de números aleatorios (*Generator Initialisation*), el cual en caso de estar puesto a 0 (valor por defecto) tanto la distribución así como el valor de *shadowing* por usuario será aleatorio, en cambio si se coloca otro entero, todas las simulaciones que tengan definido el mismo entero en el inicializador tendrán la misma distribución y valor de *shadowing* por usuario.

IV.1.2.3 Predicciones basadas en Simulaciones.

Al comparar los resultados que se obtienen de realizar predicciones basadas en simulaciones con aquellos que se obtienen en las simulaciones de Monte Carlo en sí, es posible encontrar diferencias importantes. Dichas diferencias se deben a la forma en que el *shadowing* es manejado por las predicciones y por las simulaciones.

Para las predicciones, es necesario definir (en caso de tener la opción habilitada) un margen de *shadowing* fijo para aplicar en toda la red. Sin embargo, durante la ejecución de las simulaciones, se generan valores aleatorios de *shadowing* para cada

uno de los enlaces transmisor-usuario que después son aplicados sobre el nivel de señal calculado de dicho enlace. Estos valores aleatorios se obtienen a partir de la distribución de densidad de probabilidad definida en las propiedades de cada tipo de terreno (*clutter class*).

Por lo tanto, en caso de que se quiera que los resultados de las predicciones basadas en simulaciones y las mismas simulaciones sean iguales, es necesario modificar los valores de desviación estándar del modelo y de la C/I dentro de las propiedades de los tipos de terreno y colocarlos a 0; de forma tal que no exista *shadowing* en la red para ninguno de los dos casos, lo que traería como inconveniente un estudio poco realista de la red.

Es importante mencionar que cuando las predicciones están basadas en simulaciones los únicos valores que toma de ella son los resultados referentes a la carga de las celdas, es decir, los campos: *Traffic Load DL*, *ICIC Ratio*, *UL noise rise*, *ICIC UL noise rise*.

IV.2 PLANIFICACIÓN DE RED LTE BASADA EN ATOLL

A través de uso del *software* de planificación Atoll y basándose en el esquema que presenta el manual y la información proporcionada por estudios previos realizados en el grupo GRCM en conjunto con la teoría investigada, se procedió a realizar la planificación de una red E-UTRAN LTE en la zona geográfica de Sevilla, España.

IV.2.1 CONFIGURACIÓN INICIAL.

El primer paso que se efectuó fue crear un nuevo proyecto de tipo LTE para después importar los mapas correspondientes a la ciudad de Sevilla con los formatos compatibles que acepta Atoll, los cuales contienen información relativa al terreno como la altimetría, el tipo de terreno (urbano, rural, etc.), ortofoto y vectorial; ordenándolos de manera apropiada ya que algunos de ellos no ofrecen la posibilidad de transparencia.

Como siguiente paso se creó una plantilla LTE con los parámetros que se observan en la Figura IV.1, entre ellas se muestra: antenas a 30m de altura sobre el suelo, 3 sectores como máximo por *site*, potencia del transmisor máxima de 40dBm con una canalización de 15MHz en la Banda 1 de E-UTRA, y uso de TMA en todas las estaciones además de un *scheduler* de algoritmo Round Robin.

Seguidamente se procedió a añadir un total de 43 estaciones base eNB (basadas en la plantilla mencionada), separadas en su mayoría a 1500m de distancia, distribuidas a lo largo y ancho de las zonas más habitadas de Sevilla, con una densidad definida según el tipo de terreno. El resultado de todas estas configuraciones se observa en la Figura IV.2 donde se muestra la posición y el nombre asignado a cada estación base, los transmisores asociados a cada una de ellas, así como también una representación con colores de las zonas en el mapa según el tipo de terreno (*Clutter Classes*).

The screenshot displays the configuration interface for an LTE site template in the Atoll software. The interface is organized into several sections and tabs.

General Tab:

- Name:** Plantilla LTE Sevilla
- Sectors:** 3
- Hexagon radius:** 0 m
- Transmitter type:** Intra-network (Server and Interferer)
- Antennas:**
 - 1st sector azimuth: 0 °
 - Mechanical downtilt: 0 °
 - Height/ground: 30 m
 - Additional electrical downtilt: 0 °
 - Main Antenna Model: 65deg 18dBi 0Tilt 2100MHz
 - Smart antennas: Equipment: (empty)
 - Number of antenna ports: Transmission: 1, Reception: 1
- Path Loss Matrices:**
 - Main propagation model: (Default model)
 - Extended propagation model: (none)
 - Main radius: 4,000 m
 - Extended radius: m
 - Main resolution: 20 m
 - Extended resolution: m
- Transmission/Reception Table:**

	Transmission		Reception		Equipment...
	Real	Computed	Real	Computed	
Total losses:	1.51 dB	1.51 dB	-2.09 dB	-2.09 dB	Detail
Noise figure:			4 dB	4 dB	

Transmitter Tab:

- Power and EPRE offsets relative to the reference signals EPRE:**
 - Max power: 40 dBm
 - SS offset: 0 dB
 - PDCCH offset: 0 dB
 - R5 EPRE: 12.2 dBm
 - PBCH offset: 0 dB
 - PDSCH offset: 0 dB

LTE Tab:

- Frequency band:** 2110 FDD - 15 MHz (E-UTRA Band 1)
- Cell definition per sector...**
- Reception equipment:** Default Cell Equipment
- Scheduler:** Round Robin
- Max number of users:** (empty)
- TDD frame configuration:** (empty)
- Min RSRP:** -140 dBm
- Antenna diversity:**
 - Downlink: Diversity support: (empty)
 - Uplink: Diversity support: None
 - AMS & MU-MIMO: dB
 - MU-MIMO capacity gain: 2
- Default loads:**
 - DL traffic load: 100 %
 - UL traffic load: 100 %
 - UL noise rise: 20 dB
 - Max DL traffic load: 100 %
 - Max UL traffic load: 100 %
- Inter-technology interference:**
 - DL noise rise: 0 dB
 - UL noise rise: 0 dB

Neighbours Tab:

- Max number of neighbours:**
 - Intra-technology: 16
 - Inter-technology: 16

Figura IV.1: Configuración de Plantilla LTE Sevilla

Fuente: Elaboración Propia

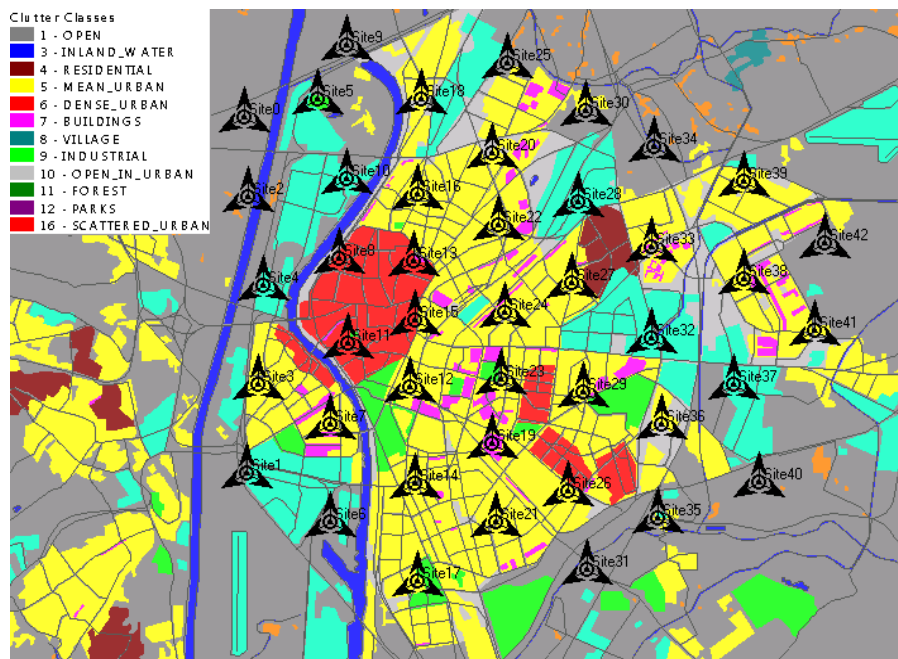


Figura IV.2: Mapa de Sevilla con los eNBs y tipos de terreno
Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se realizó la configuración del modelo de propagación. Para ello, primero se eligió el modelo Cost-Hata para toda la red, dado que considera el perfil de terreno y la caracterización estadística del mismo [5], para después asignar las fórmulas a utilizar según el tipo de terreno (*Clutter Classes*) dentro de las propiedades del modelo como se muestra en la Figura IV.3.

Cost-Hata Properties	
General Configuration	
Formulas assigned to clutter classes	
Default formula	Medium sized city & suburban
1 - OPEN	4 - Rural (open area)
3 - INLAND_WATER	4 - Rural (open area)
4 - RESIDENTIAL	1 - Metropolitan center
5 - MEAN_URBAN	1 - Metropolitan center
6 - DENSE_URBAN	1 - Metropolitan center
7 - BUILDINGS	1 - Metropolitan center
8 - VILLAGE	1 - Metropolitan center
9 - INDUSTRIAL	1 - Metropolitan center
10 - OPEN_IN_URBAN	3 - Rural (quasi-open)
11 - FOREST	3 - Rural (quasi-open)
12 - PARKS	3 - Rural (quasi-open)
16 - SCATTERED_URBAN	1 - Metropolitan center

Figura IV.3: Asignación de las fórmulas del modelo Cost-Hata según el tipo de terreno
Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente se revisó la configuración de cada uno de los servicios, los tipos movilidad y los tipos de terminales de usuario disponibles por defecto en la herramienta. Para el caso de los servicios se modificaron las velocidades mínimas de transmisión, adaptándolas a valores más reales, dejando el resto de parámetros sin modificar. En cambio, para la movilidad y los terminales no se hicieron ningún tipo de modificaciones.

IV.2.2 ESTUDIOS DE NIVEL DE SEÑAL

Antes de realizar cualquier estudio se definió la zona de cálculo denominada *Computation Zone*, y a continuación se realizaron estudios de cobertura independientes de la carga de tráfico como los mostrados en la Tabla IV.1. El objetivo de dichos estudios era analizar el estado inicial de red desde el punto de vista de las condiciones de propagación. Los resultados para cada estudio se muestran desde la Figura IV.4 hasta la Figura IV.6.

ID	Tipo de Estudio	Condiciones			Display
		Signal Level	Server	Shadowing	
1	Coverage by Signal Level	≥-105 dBm	All	80%	Value Intervals: -70:-5:-105
2	Coverage by Transmitter		Best Server, Margin 4dB		Discrete Values
3	Overlapping Zones		All		Value Intervals: 1:1:5

Tabla IV.1: Estudios independientes de la carga de tráfico. (1, 2 y 3)

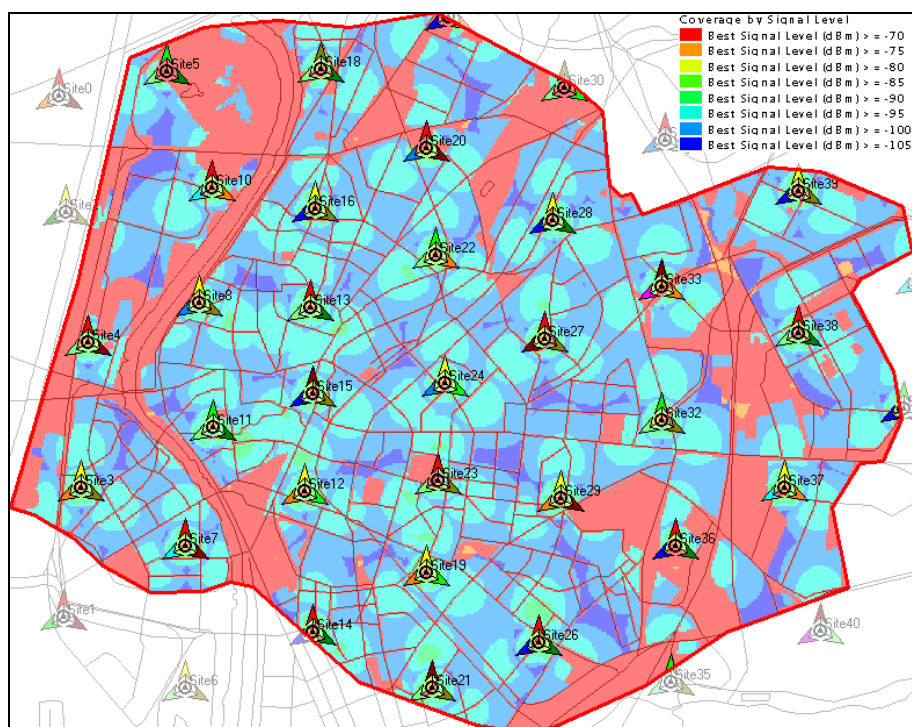


Figura IV.4: Estudio 1 - Cobertura por nivel de señal de referencia recibido
Fuente: Elaboración Propia

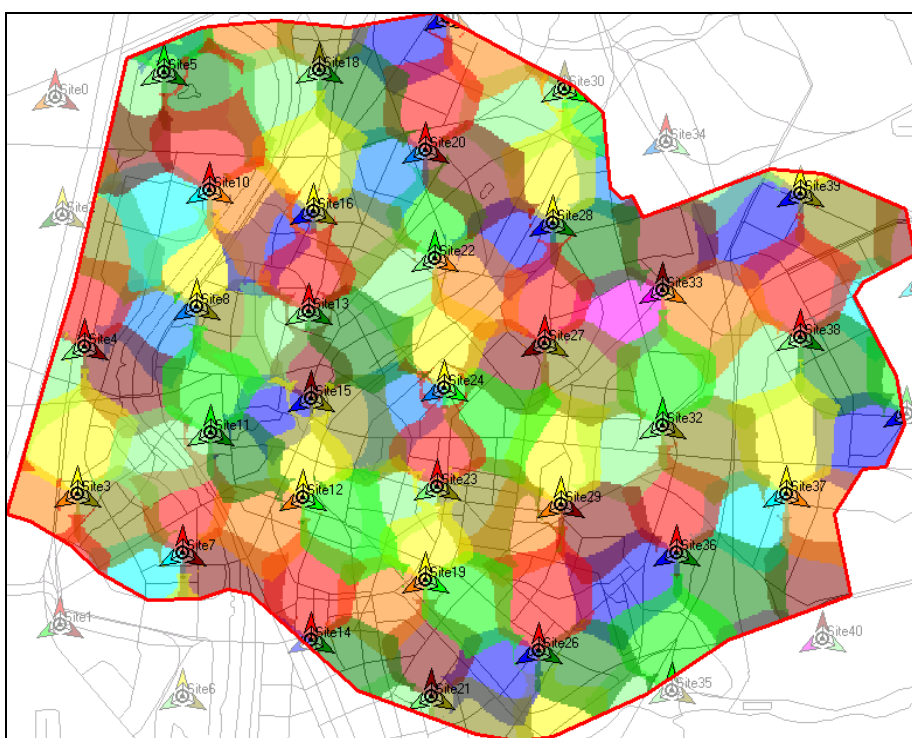


Figura IV.5: Estudio 2 - Cobertura por transmisor
Fuente: Elaboración Propia

un margen de diferencias de potencia se puede controlar al área donde se ejecutan las técnicas para la gestión de interferencia.

Es importante resaltar que los cálculos de cada una de las predicciones de la Tabla IV.1 se realizan en función a los niveles de las señales de referencia, las cuales están repartidas en todo el ancho de la banda utilizada y que para estas pruebas iniciales se estableció en 15MHz. Por lo tanto, si la potencia de todos los transmisores se mantiene fija, los resultados de los estudios anteriores serían independientes del ancho de banda de canal que se esté utilizando, siempre y cuando las bandas estén ubicadas sobre las mismas frecuencias.

Posteriormente se realizaron estudios sobre el nivel de señal efectivo de los canales físicos de tráfico en LTE PUSCH y PDSCH (los cuales también son independientes de la carga de tráfico) como los mostrados en la Tabla IV.2. Para realizar estos estudios fue necesario seleccionar, dentro de las condiciones de cada predicción, el tipo de terminal, tipo de servicio y movilidad, ya que para generar los cálculos Atoll coloca un terminal de prueba (con el servicio y la movilidad definida) en cada pixel y según los niveles de señal recibida colorea el píxel estudiado de cierta forma u otra, tomando en cuenta los umbrales que estén definidos en la pestaña *display* de cada predicción.

ID	Tipo de Estudio	Display
4	Effective Signal Analysis (DL)	Best PDSCH Signal Level (DL) Value Intervals: -50:-10:-120
5		PDSCH C/N Level (DL) Value Intervals: 30:-1:-20
6	Effective Signal Analysis (UL)	Best PDSCH Signal Level (UL) Value Intervals: -50:-10:-120
7		PDSCH C/N Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
Para todos los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>Mobile Terminal</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>VoIP</i> y un <i>Shadowing</i> de 80%		

Tabla IV.2: Estudios de nivel de señal PDSCH y PUSCH. (4, 5, 6 y 7)

Cabe destacar que en las predicciones de tipo portadora a ruido (C/N) se utilizan las figuras de ruido definidas en las propiedades de los terminales y los transmisores (de la eNB) para calcular el ruido total en los enlaces descendentes y ascendentes respectivamente.

Los resultados de las predicciones de la Tabla IV.2 se muestran a continuación:

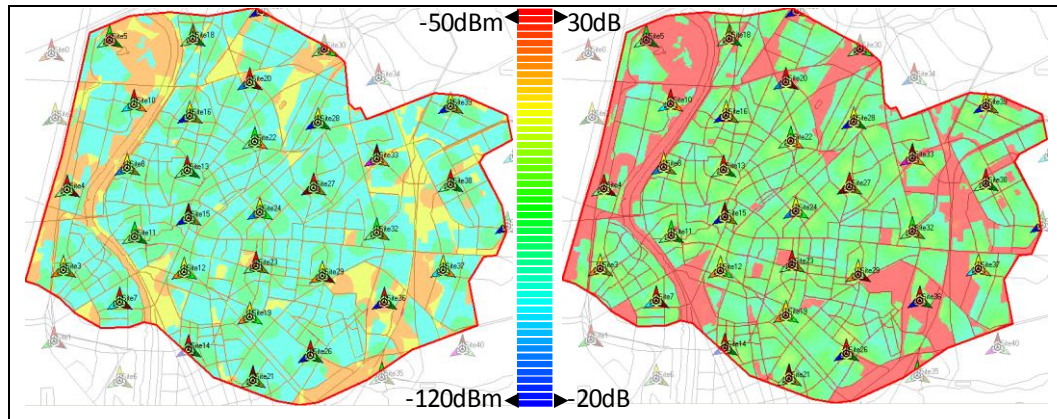


Figura IV.7: PDSCH – Mejor Nivel de Señal (izq.) y C/N (dcha.). Downlink
Fuente: Elaboración Propia

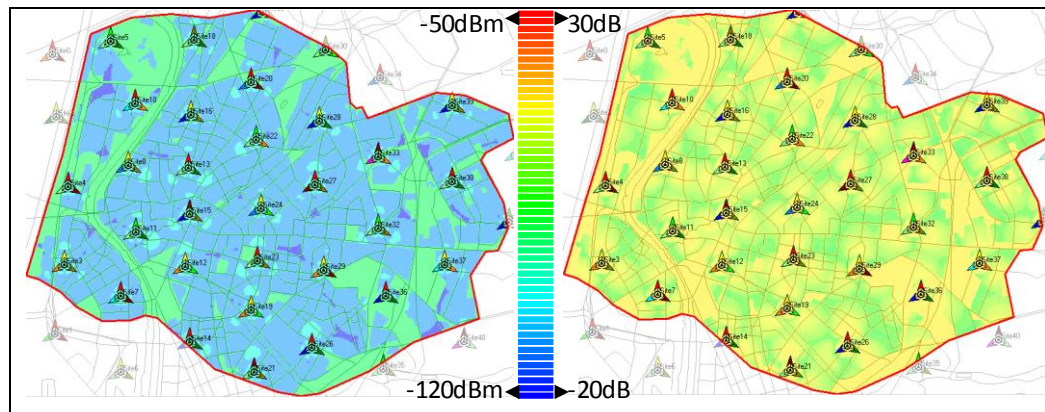


Figura IV.8: PUSCH – Mejor Nivel de Señal (izq.) y C/N (dcha.). Uplink
Fuente: Elaboración Propia

Para ambos enlaces los valores más altos corresponden a los colores rojizos, el resto de valores inferiores son un degradado de colores hasta llegar a los tonos de azules correspondientes a los más bajos, como se muestra en la barra ubicada en el medio de ambas figuras.

Observando los resultados correspondientes al mejor nivel de señal se podría afirmar que el enlace descendente presenta las mejores condiciones de ambos, ya que logra alcanzar valores superiores a los -70dBm (tonos anaranjados) y -100dBm (turquesa) en la mayoría de zonas, en contraste a los valores cercanos a -120 dBm (azules oscuros) que abarcan la mayor área en el ascendente. Sin embargo, si comparamos el caso de portadora a ruido el enlace descendente presenta valores cercanos a 30dB (rojos) y alrededor de los 3dB (verdes), en cambio el ascendente presenta en la mayor parte de su área valores que superan los 12 dB.

Por lo tanto, para poder hacer un estudio con un criterio más adecuado, se realizó un análisis de la función de distribución acumulativa (a través de la herramienta *histogram* de Atoll) con los valores en dB de la señal recibida por porcentaje de área cubierta como se muestra en la Figura IV.9.

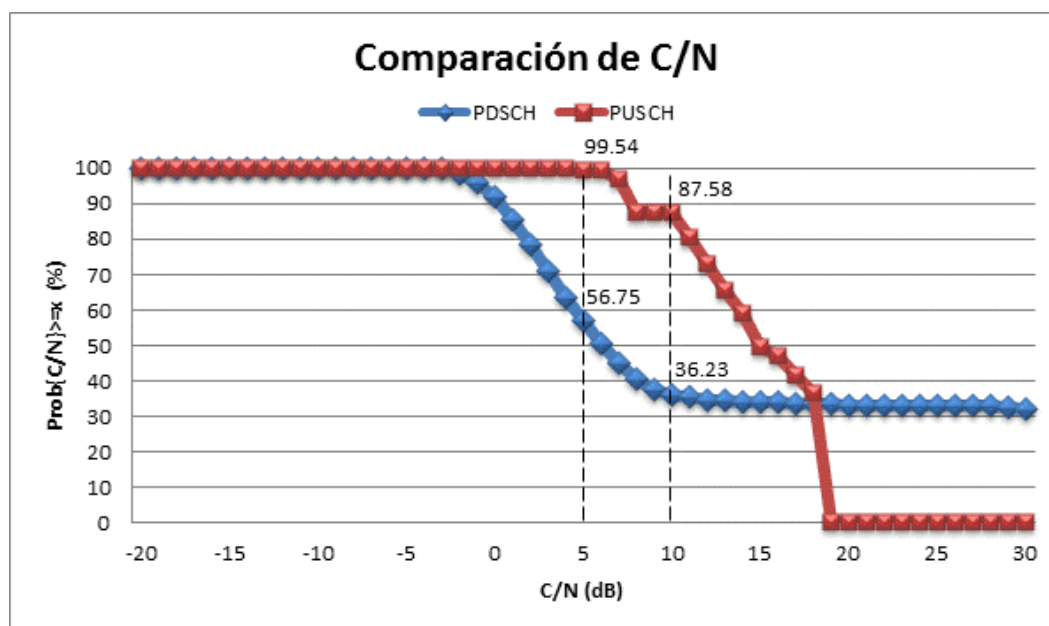


Figura IV.9: Comparación de C/N en los enlaces ascendente y descendente
Fuente: Elaboración Propia

En ella se puede observar que en *downlink* el 56.75% de los puntos en el mapa presentan una relación C/N superior a 5 dB, en comparación al 99.54% del *uplink*. De la misma forma y con una diferencia mayor, se presenta para el caso de 10dB donde

los porcentajes para el *downlink* son apenas del 36.23%, muy inferior al 87.58% del *uplink*. De esta forma se verificó que el enlace que limita la cobertura del despliegue es el descendente.

IV.2.3 ESTUDIOS DE CALIDAD DE SEÑAL.

Los estudios de calidad de señal son dependientes del tráfico y sirven para analizar la capacidad de la red y su funcionamiento. La carga de tráfico se puede establecer a través de los resultados de las simulaciones o a través de los campos *UL Noise Rise* y *DL Traffic Load* definidos en la tabla de celdas.

Para una primera aproximación se realizaron los estudios mostrados en la Tabla IV.3, basando la carga de tráfico en la tabla de celdas con valores extremadamente pesimistas como 100% de carga en el *downlink* y 20dB de *uplink noise rise* para cada una de las celdas. Los resultados se muestran en la Figura IV.10.

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
8	Coverage by C/(I+N) Level (DL)	Cells Table	PDSCH C/(I+N) Level (DL) Value Intervals: 30:-1:-20
9	Coverage by C/(I+N) Level (UL)		PUSCH C/(I+N) Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
Para todos los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>Mobile Terminal</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>VoIP</i> , un <i>Shadowing</i> de 80%.			

Tabla IV.3: Estudios de Calidad de señal PDSCH y PUSCH basado en tabla de celdas. (8 y 9)

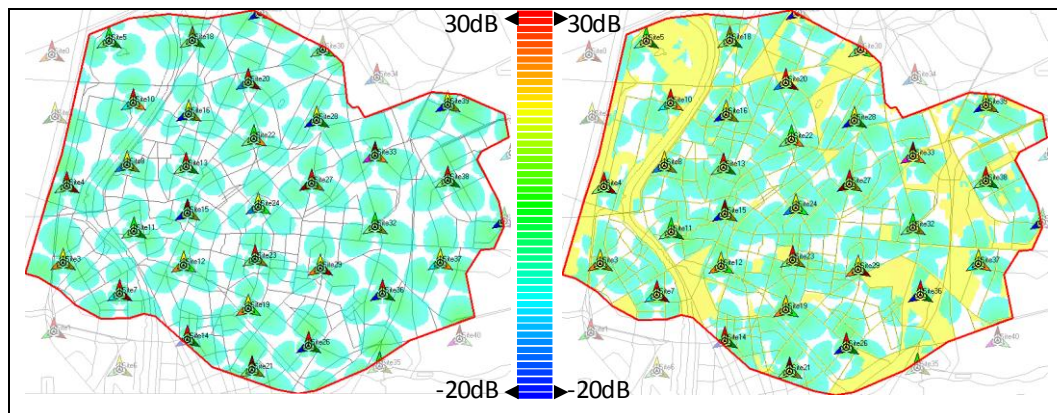


Figura IV.10: C/(I+N) - PDSCH (izq.) y PUSCH (dcha.) situación pesimista

Fuente: Elaboración Propia

En los estudios 8 y 9 se observó el impacto que generan las interferencias sobre la zona de cobertura y los niveles de señal recibidos en cada uno de los enlaces. Sin embargo, a pesar de que se aprecia una reducción de la zona de cobertura en ambos, es importante mencionar que no es posible comparar los dos enlaces de forma ‘justa’ debido a la forma en que son calculadas las interferencias intercelulares en Atoll. En el *downlink* las interferencias que percibe un usuario se obtienen a partir del solapamiento que exista entre los canales de la celda servidora y las celdas interferentes (clasificadas como co-canal y canal adyacente), así como el porcentaje de carga de estas últimas. En cambio en el *uplink* simplemente utiliza directamente el valor de *uplink noise rise*¹ que tenga definido como la interferencia generada por los usuarios de otras celdas

Posteriormente se creó un mapa de tráfico sobre la zona de estudio para realizar simulaciones de Monte Carlo a partir de él. Dicho mapa de tráfico se realizó en base a los tipos de terreno definidos en las *Clutter Classes* y se observa en la Figura IV.11.

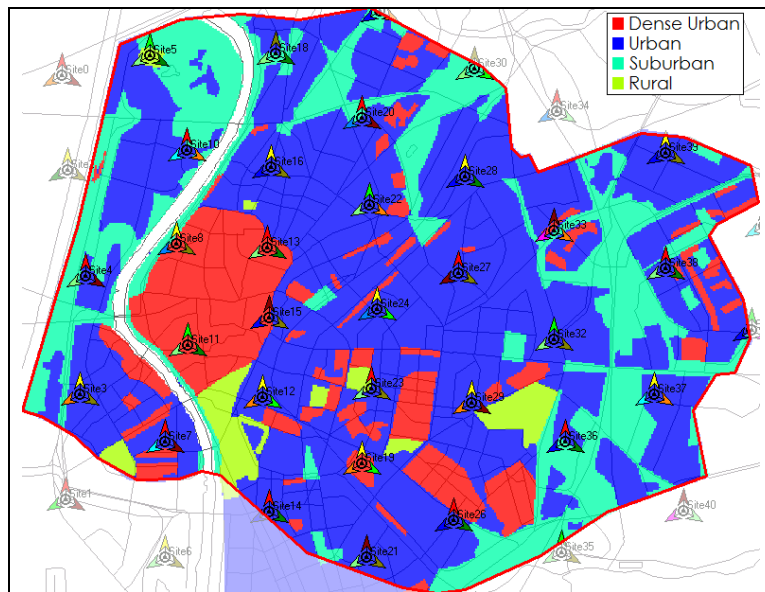


Figura IV.11: Mapa de Tráfico de Sevilla
Fuente: Elaboración Propia

¹ El *uplink noise rise* se puede definir directamente en la tabla de celdas, o como resultado de las simulaciones de Monte Carlo, en el que se tomaría en cuenta el solapamiento de canales.

Una vez realizado el mapa se revisó la densidad de usuarios por terreno definido en Atoll y se mantuvieron los mismos valores que estaban por defecto. De igual forma se inspeccionaron los perfiles de usuarios (*standard y business*) y la relación existente entre los diversos servicios con el tipo de terminal para cada perfil sin realizar ninguna modificación adicional.

Para poder realizar las simulaciones en Atoll de una forma realista y óptima se realizaron cada uno de los pasos que se explican a continuación:

El primero fue determinar los vecinos de cada celda, para ello el *software* de Atoll proporciona la herramienta ANP (*Automatic Neighbour Planning*) que permite la asignación automática de vecinos. Se estableció un límite máximo de 16 vecinos y una distancia máxima de 4000m entre vecinos, considerándose un *shadowing* del 80% y un margen RSRP de 5dB.

El siguiente paso fue realizar la asignación de frecuencias para cada celda. A pesar de que Atoll posee también una herramienta para definirlo de forma automática, se decidió no utilizarla de momento, manteniendo el canal '0' como canal asignado para todas las celdas como estaba establecido inicialmente.

Por último se realizó la planificación de los identificadores de celda (*Physical Cell ID*), que es un número entero que varía entre 0 y 503, que permite identificar a cada celda entre otras funciones. Para lograrlo se utilizó la herramienta AFP de Atoll, utilizando los 504 valores posibles sin restricciones.

Después de realizar todas las configuraciones mencionadas se procedió a realizar una simulación de Monte Carlo la cual se denominó con el nombre de 'Base', para posteriormente evaluar el comportamiento de la red (en cuestión de nivel de portadora a ruido más interferencia) de forma más realista que la realizada anteriormente. En la configuración de las simulaciones se dejaron todos los valores por defecto, incluyendo el inicializador del generador a 0. Sin embargo, es importante destacar que para realizar las simulaciones Atoll también considera (en referencia a

las interferencias) los valores que se encuentran en los campos de *Max Uplink Noise Rise* y *Max Downlink Traffic Load* definidos en la tabla de celdas para limitar el máximo valor de interferencia que pueden generar los usuarios y la máxima carga de tráfico que puede presentar una celda en el *downlink*.

El resultado de la simulación Base se puede observar en la Figura IV.12, donde se aprecia que solamente existen usuarios conectados (en cualquiera de los dos enlaces o en ambos) e inactivos. Asimismo se puede observar como varía la densidad de usuarios según las zonas definidas en el mapa de tráfico.

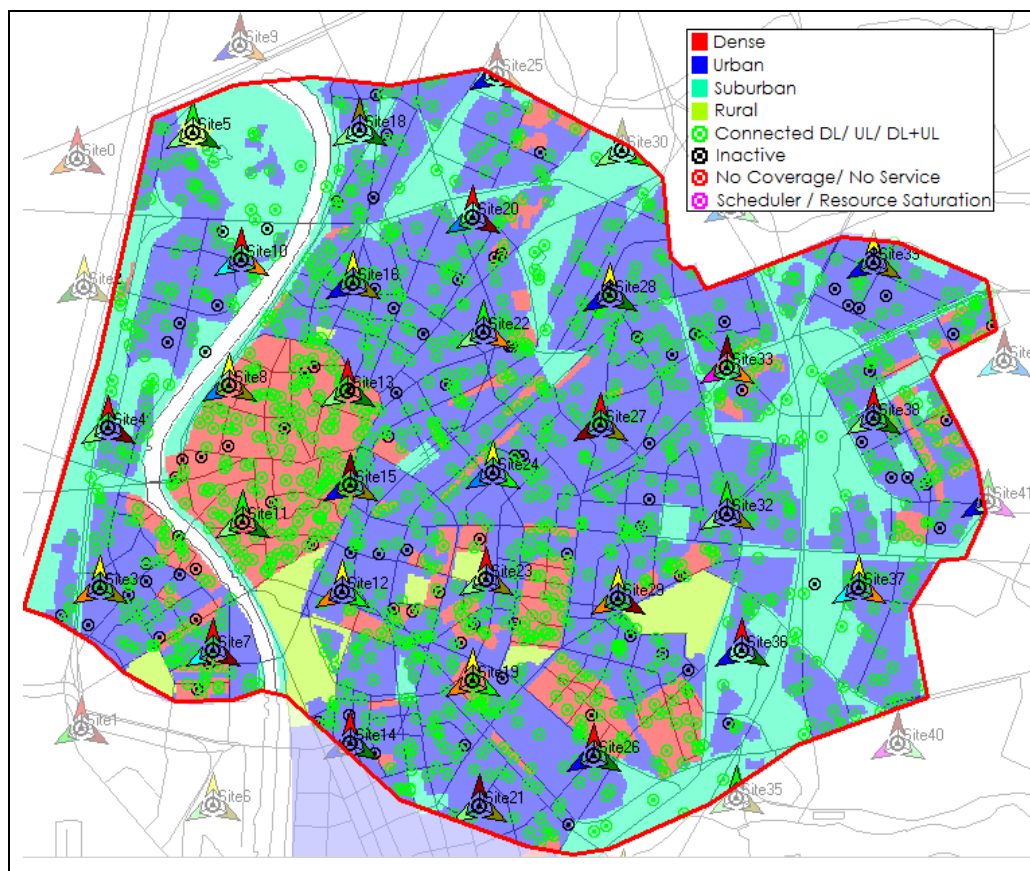
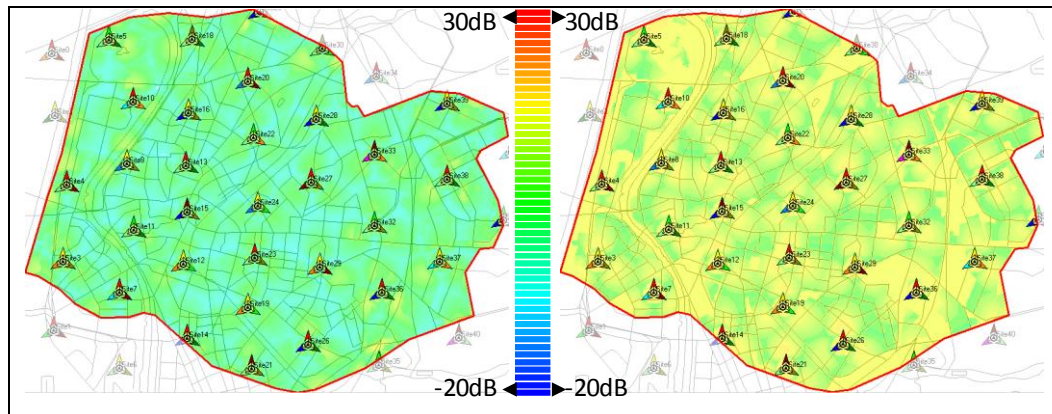


Figura IV.12: Resultado de simulación Base
Fuente: Elaboración Propia

Tras haber realizado la simulación se procedió a ejecutar un conjunto de predicciones basadas en ella, las cuales se muestran en la Tabla IV.4 y cuyos resultados se presentan en la Figura IV.13.

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
10	Coverage by C/(I+N) Level (DL)	Base	PDSCH C/(I+N) Level (DL) Value Intervals: 30:-1:-20
11	Coverage by C/(I+N) Level (UL)		PUSCH C/(I+N) Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
Para todos los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>Mobile Terminal</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>VoIP</i> , un <i>Shadowing</i> de 80%.			

Tabla IV.4: Estudios de Calidad de señal PDSCH y PUSCH basado en simulaciones. (10 y 11)



**Figura IV.13: C/(I+N) - PDSCH (izq.) y PUSCH (dcha.) situación realista
Fuente: Elaboración Propia**

De los estudios 10 y 11 se obtuvo una huella de cobertura suficientemente amplia como para abarcar toda la zona de estudio en ambos enlaces. Posteriormente se procedió a comparar el impacto que generan las interferencias basadas en los dos métodos de recreación de tráfico (tabla de celdas y mapas de tráfico) sobre los niveles de C/N recibida originales como se muestra en la Figura IV.14 y Figura IV.15, utilizando la función de distribución acumulativa basada en toda el área de la zona de estudio.

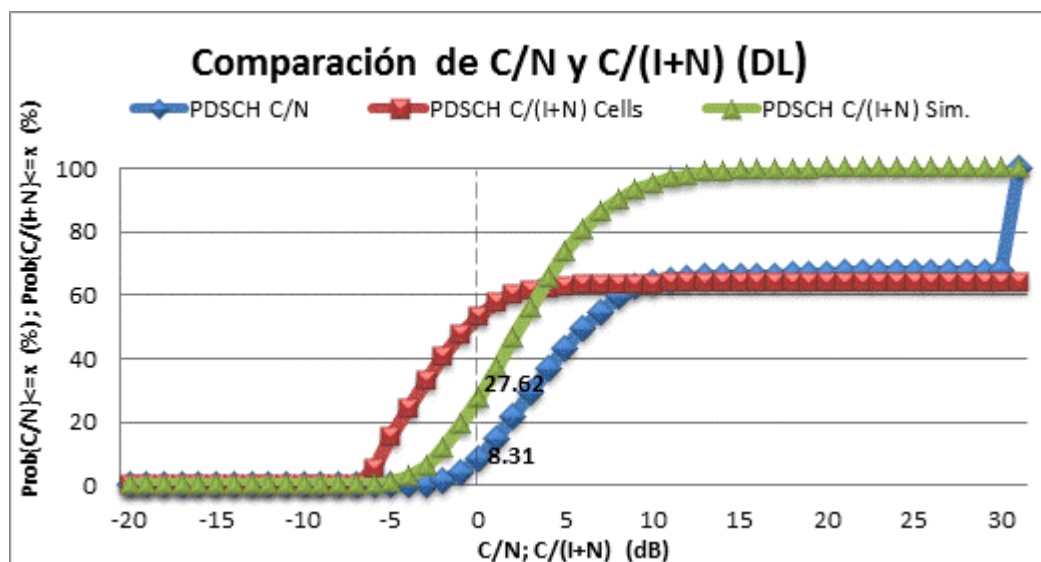


Figura IV.14: Comparación de C/N y C/I+N *downlink* (Celdas y Simulación Base)
Fuente: Elaboración Propia

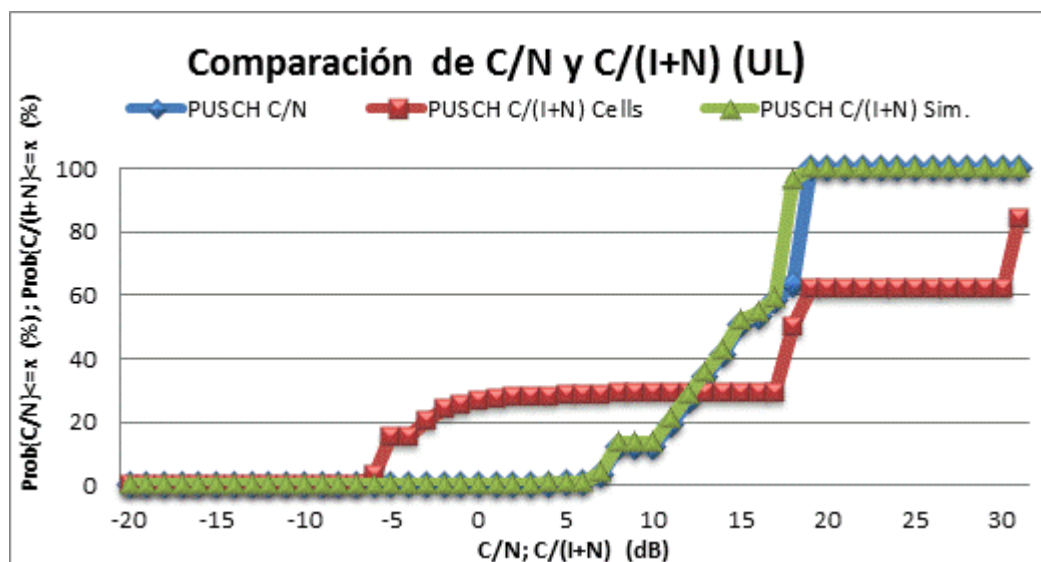


Figura IV.15: Comparación de C/N y C/I+N *uplink* (Celdas y Simulación Base)
Fuente: Elaboración Propia

En ambas figuras se observa que las predicciones basadas en la tabla de celdas no llegan al 100% ya que no alcanzan a cubrir el área de estudio en su totalidad. Además se muestra como la interferencia intercelular afecta en mayor medida al enlace descendente (Figura IV.14) ya que el 27.62% de los puntos en el mapa presentan una C/I+N inferior a 0dB en comparación al 8.31% del estudio C/N inicial. En cambio en

el enlace ascendente (Figura IV.15) los valores de ambas son sumamente similares, reflejando así el poco nivel de interferencias que se generaron en las simulaciones de Monte Carlo.

Por último y a modo de prueba se compararon los resultados arrojados por la simulación Base con los resultados de las posibles predicciones que se puedan realizar basadas en dicha simulación. Para ello se hizo uso de la herramienta *Point Analysis* seleccionando la simulación Base como base del tráfico de la red con la finalidad de estudiar un punto del mapa sobre el cual había sido ubicado un usuario durante la ejecución del algoritmo de la misma simulación Base y que presentase una conexión activa en ambos enlaces. En las Figura IV.16 y Figura IV.17 se observa que la ubicación tanto del usuario como la del terminal de prueba o *Receiver* del *Point Analysis* es la misma, adicionalmente se exponen las coordenadas del punto estudiado, las características del terminal y servicio utilizado, entre otras características. Por último se muestran algunos de los resultados obtenidos para cada caso.

Observando los resultados de ambos casos se pudo notar la gran diferencia que presentan entre sí. Dicha diferencia radica en la forma en que ambos estudios toman en consideración el *shadowing*. En las simulaciones el *shadowing* es calculado a partir de valores aleatorios para cada uno de los enlaces entre transmisor-usuario que se generen durante el proceso. En cambio al hacer las predicciones, o en su defecto utilizar la herramienta *Point Analysis*, se ha de definir un porcentaje de *shadowing* fijo a utilizar en toda la zona de estudio. Esta justificación da a entender por qué son diferentes hasta los valores de *pathloss* para cada caso, sabiendo que básicamente solo depende del modelo de propagación (el cual en ninguno momento ha sido modificado). Por lo tanto a la hora de realizar simulaciones y/o predicciones no es posible comparar los resultados numéricos de ambos directamente, más si es posible comparar la tendencia de los resultados

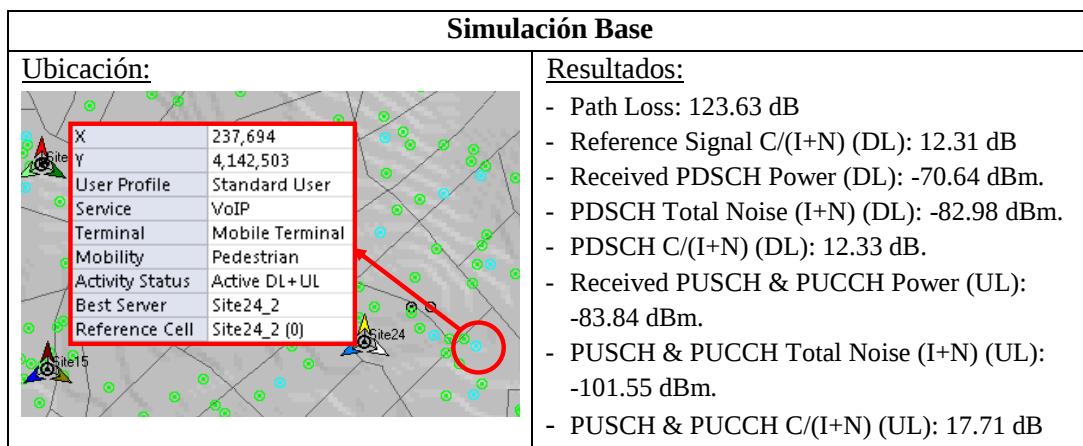


Figura IV.16: Resultados de la Simulación Base para un usuario
Fuente: Elaboración Propia

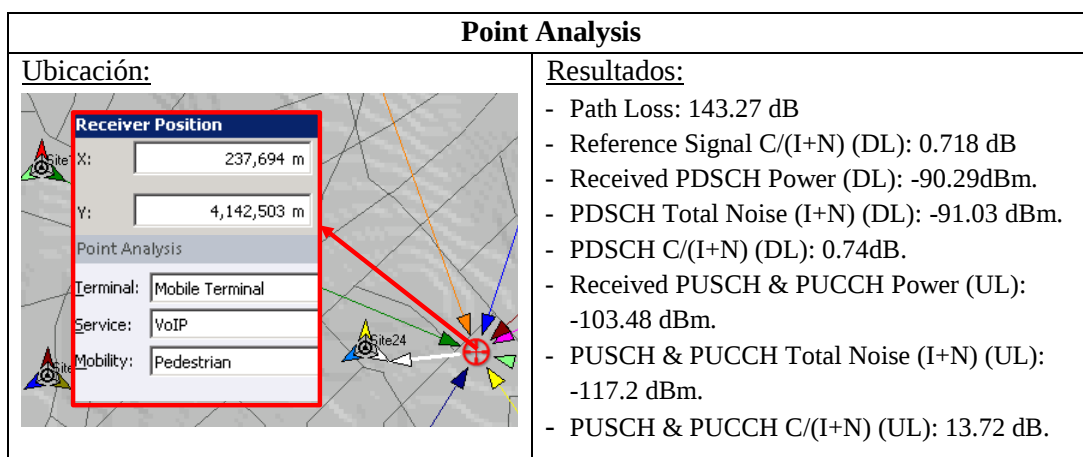


Figura IV.17: Resultados del Point Analysis para un punto en el mapa
Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V.

ESCENARIOS, RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En este capítulo se describen algunos escenarios planteados que permiten entender la forma en que Atoll genera diversos resultados, y también sirven para poder evaluar el comportamiento de la red creada previamente. En un principio se plantean esquemas de reuso de frecuencia FFR1 y FFR3 en conjunto con la estrategia de coordinación de interferencias ICIC (basada en *FFR Time-Divided*) empleada por Atoll, evaluando después los resultados que se obtienen al utilizar predicciones basadas en simulaciones de tráfico, al igual que los resultados propios que se generan cada vez que se realiza una o un grupo de simulaciones.

Posteriormente se estudia el impacto que se puede producir sobre un enlace cuando en el otro se habilita la opción para utilizar la estrategia ICIC, para después investigar las consecuencias que genera el aumentar la densidad de usuarios de toda la red y modificar los radio *bearer* mínimos por servicios. Finalmente se estudia el impacto que se produce en el *uplink* al emplear servicios simétricos y los resultados que se generan al implementar técnicas MIMO combinado con ICIC para ambos enlaces.

V.1 ICIC Y ESQUEMAS DE REÚSO DE FRECUENCIA EN PREDICCIONES

En este escenario se compararon los esquemas de reuso de frecuencia FFR1, FFR3 con la estrategia ICIC, véase Figura V.1. Al principio se explican las modificaciones realizadas para generar cada una de estas estrategias y al final se hace una comparación de los resultados obtenidos en cada enlace.

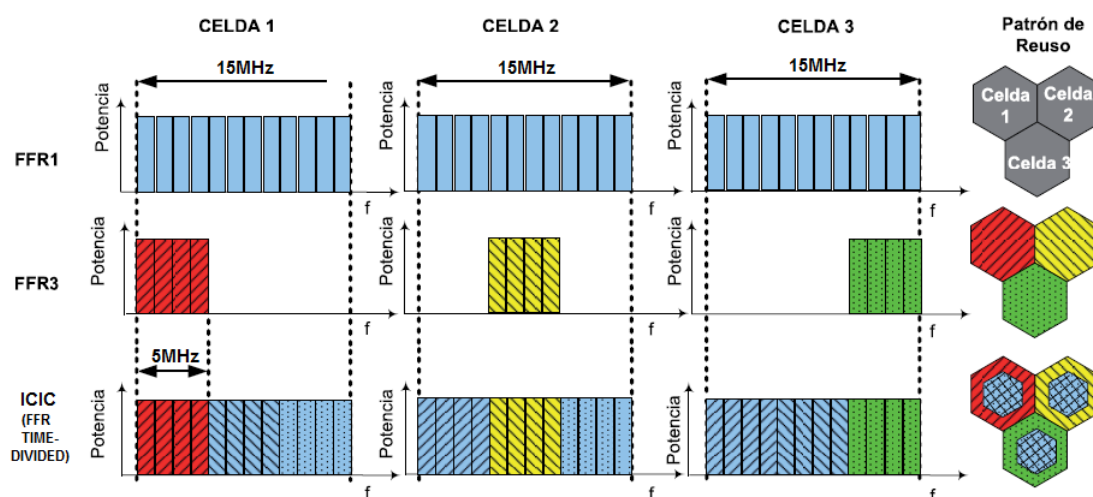


Figura V.1: Distribución del espectro para FFR1, FFR3 y estrategia ICIC
Fuente: Elaboración Propia

Es importante mencionar que aunque se denomine ICIC a la estrategia de gestión de interferencias entre celdas, existen diferentes formas de hacer dicha gestión. Una de ellas es la empleada por Atoll, la cual está basada en el reuso de frecuencias estático, y consiste en utilizar todo el canal asignado en el centro de la zona de cobertura de la celda y sólo una porción del mismo en el borde; cada porción tendría que ser distinta entre celdas contiguas para poder reducir de esta forma las interferencias. Esta técnica de reuso frecuencial se conoce como *FFR Time-Divided*.

Como primer paso fue necesario determinar las zonas que Atoll consideraría como bordes de celda y centro de celda, esta división es realizada a través de un valor de umbral fijo llamado *ICIC Delta Path Loss*, que se define para un píxel del mapa como la diferencia de *path loss* (en dB) entre el segundo y el primer mejor servidor, si la diferencia es menor que el valor establecido de *ICIC Delta Path Loss* ese píxel es considerado del borde de celda, de lo contrario es del centro de celda, puede ser aplicado en cualquiera de los dos enlaces o inclusive en ambos, siempre y cuando esté la opción de ICIC habilitada en la tabla de celdas. La fracción de canal asignada a cada celda se determina a partir del valor de PSS ID (0,1 ó 2) que tenga, establecido al momento de realizar la planificación de *Physical Cell ID*. Por defecto cada fracción de canal corresponde con un tercio del ancho de banda de todo el canal.

Por lo tanto, para definir el valor de umbral a fijar se realizó un estudio con las características mostradas en la Tabla V.1

ID	Tipo de Estudio	Display
12	Effective Signal Analysis (DL)	Delta Path Loss (dB) Value Intervals: 18:-0.5:1
Para el estudio de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>MIMO</i> ¹ , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>Web Browsing</i> y <i>Shadowing</i> de 80%.		

Tabla V.1: Estudio del Delta Path Loss

Gracias al estudio 12 se pudo analizar el comportamiento del parámetro *Delta Path Loss*. Los resultados obtenidos sobre la zona de estudio se muestran en la Figura V.2.

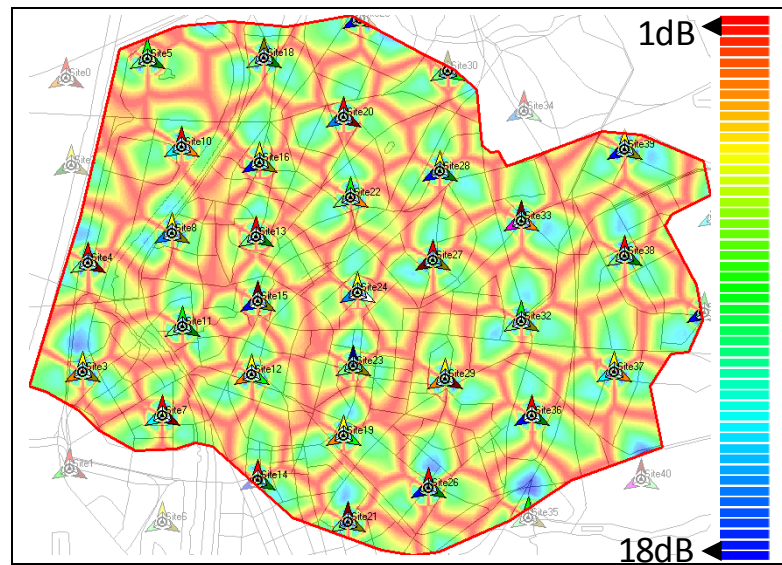


Figura V.2: Delta Path Loss de la zona de estudio
Fuente: Elaboración Propia

En ella se observan que los colores rojizos corresponden a los niveles donde la diferencia entre los dos mejores servidores es cercana a 1dB, por lo tanto es donde posiblemente existan mayores niveles de interferencia. Para poder conocer el

¹ Cabe destacar que a pesar de que se esté utilizando un terminal MIMO, como la red no tiene habilitada ninguna estrategia de diversidad y las configuraciones (Figura de Ruido, Ganancia de antena, etc.) de ambos terminales son iguales, el resultado sería el mismo que utilizando un *Mobile Terminal*. La razón por la que se escogió este terminal es que dentro de los perfiles de usuario por defecto definidos en Atoll, el servicio *Web Browsing* está asociado únicamente a un tipo de terminal MIMO.

porcentaje de pixeles que corresponde a cada valor de *Delta Path Loss* se procedió a calcular la función de distribución acumulativa, cuyo resultado se expone en la Figura V.3.

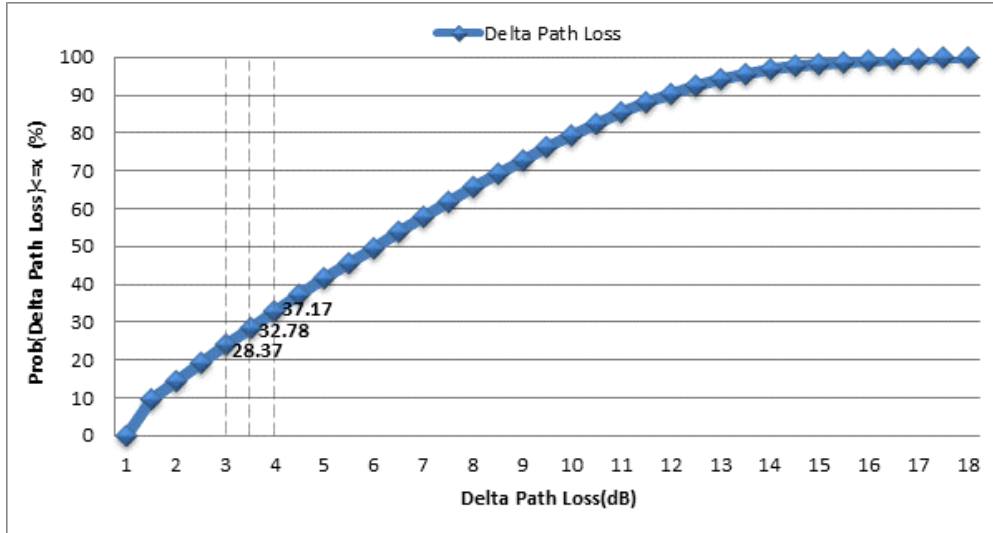


Figura V.3: ICDF de *Delta Path Loss* sobre la zona de estudio
Fuente: Elaboración Propia

Después de comparar los porcentajes correspondientes al área de los bordes de celda según cada valor de umbral, se decidió elegir un *Delta Path Loss* de 3dB que cubre al 28.37% del área total de estudio.

El siguiente paso fue añadir el valor de umbral de 3dB en la tabla de celdas, además de activar el uso de la estrategia ICIC para ambos enlaces dentro de la misma tabla. Seguidamente se creó un grupo de 10^2 simulaciones de nombre ‘ICIC’, para así poder realizar los estudios 13, 14, 15 y 16 que se presentan en la Tabla V.2 con el fin de analizar tanto la cobertura como la capacidad de la red en ambos enlaces.

Una vez llevado a cabo los estudios mencionados, se realizaron los cambios necesarios para establecer la estrategia de reúso frecuencial FFR3. Para ello se definió una nueva banda de frecuencias en Atoll basándose en la ya existente “2110 FDD –

² El beneficio de utilizar un grupo de simulaciones, en vez de una, es que al promediarlos se obtienen resultados más fiables y realistas.

5MHz (E-UTRA Band 1)”, modificando únicamente la cantidad de canales disponibles limitándolo a sólo 3 canales que juntos representan un ancho de banda para la red de 15MHz. Posteriormente se asignó un canal para cada celda a través del uso de la herramienta AFP de Atoll.

De igual forma que el caso anterior, se procedió a hacer un grupo de 10 simulaciones, pero esta vez de nombre ‘FFR3’ para ser usadas como la carga de tráfico en las predicciones 17, 18, 19 y 20 mostradas de la Tabla V.2

A continuación se devolvieron los cambios realizados, es decir, se restableció el tipo de banda inicial, y se asignó el canal 0 para todas las celdas. Asimismo se creó un nuevo grupo de 10 simulaciones de nombre ‘FFR1’, ya que con las condiciones establecidas se puede representar un esquema de reuso frecuencial igual a 1, en donde toda la banda de la red corresponde al canal 0 y es utilizado por todas las celdas. Dicho grupo de simulaciones fue utilizado para hacer los estudios 21, 22, 23 y 24 mostrados en la Tabla V.2.

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
13	Coverage by C/(I+N) Level (DL)	ICIC	PDSCH C/(I+N) Level (DL) Value Intervals: 30:-1:-20
17		FFR3	
21		FFR1	
14	Coverage by C/(I+N) Level (UL)	ICIC	PUSCH C/(I+N) Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
18		FFR3	
22		FFR1	
15	Coverage by Throughput (DL)	ICIC	Effective RLC Channel Throughput (DL) Value Intervals: 60000:-500:0
19		FFR3	
23		FFR1	
16	Coverage by Throughput (UL)	ICIC	Effective RLC Channel Throughput (UL) Value Intervals: 60000:-500:0
20		FFR3	
24		FFR1	
Para los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>MIMO</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>Web Browsing</i> y <i>Shadowing</i> de 80%.			

Tabla V.2: Estudios de C/(I+N) y Throughput utilizando ICIC, FFR3 y FFR1

Los resultados de todas las predicciones de la Tabla V.2 se observan desde de la Figura V.4 hasta la Figura V.7.

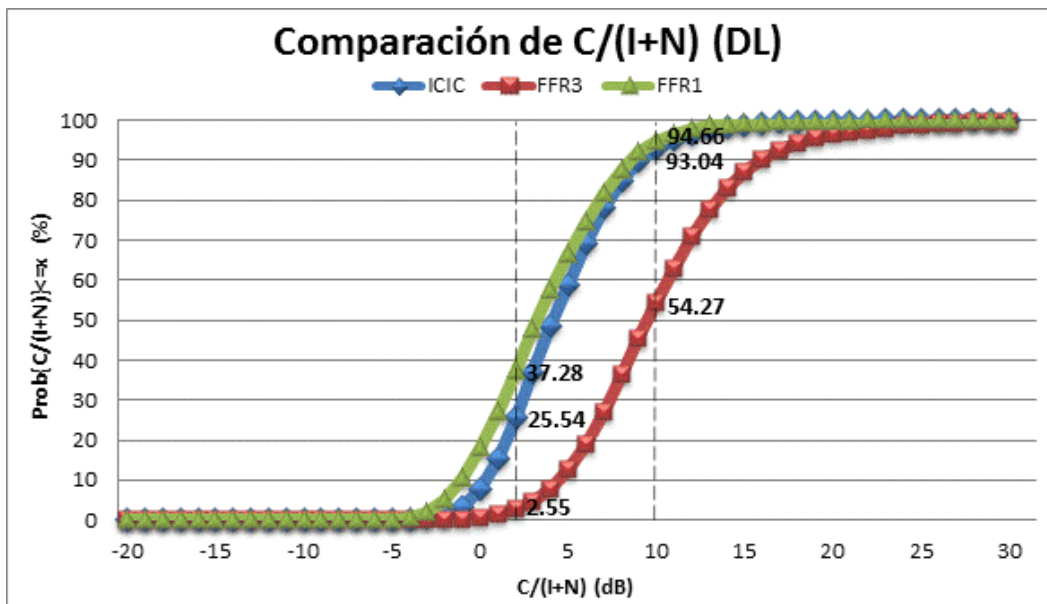


Figura V.4: Comparación del PDSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR3 y FFR1
Fuente: Elaboración Propia

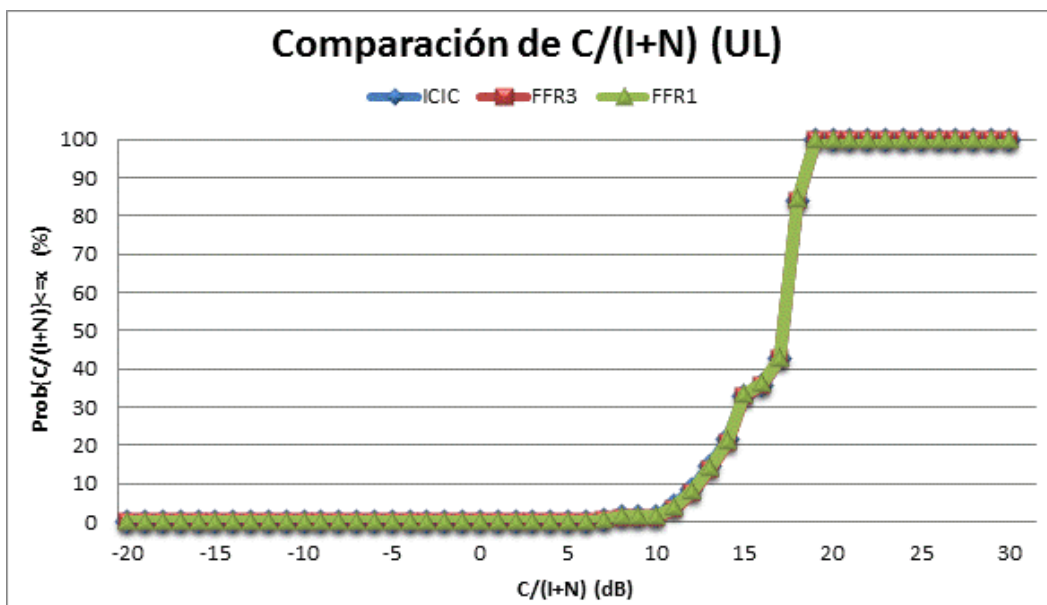


Figura V.5: Comparación del PUSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR3 y FFR1
Fuente: Elaboración Propia

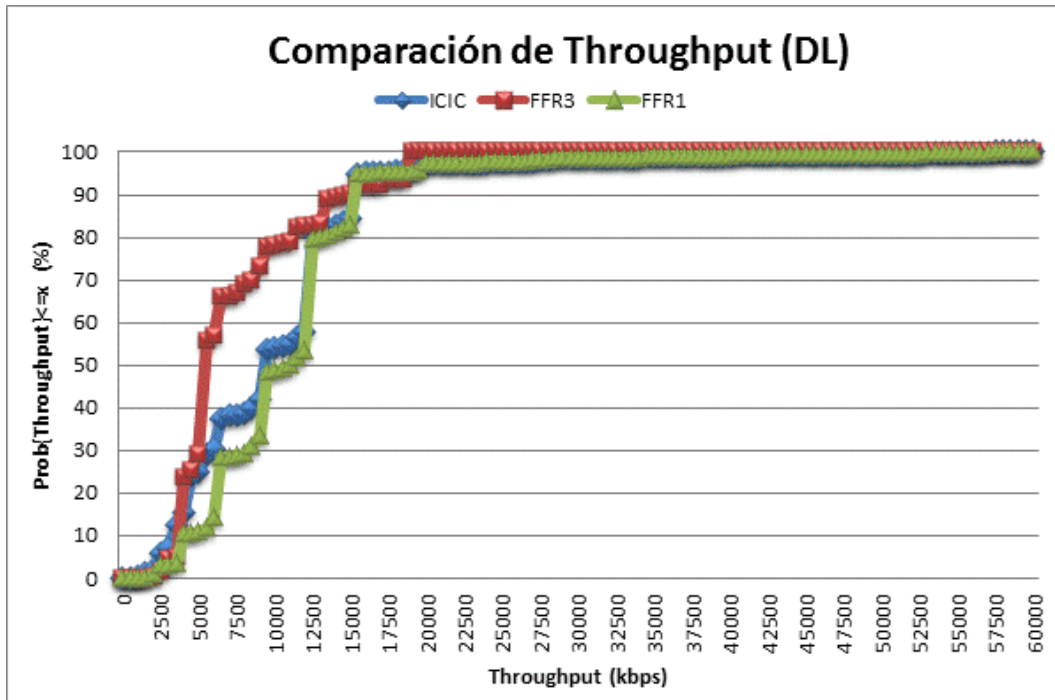


Figura V.6: Comparación del *Effective RLC Channel Throughput* en ICIC, FFR3 y FFR1 para el downlink

Fuente: Elaboración Propia

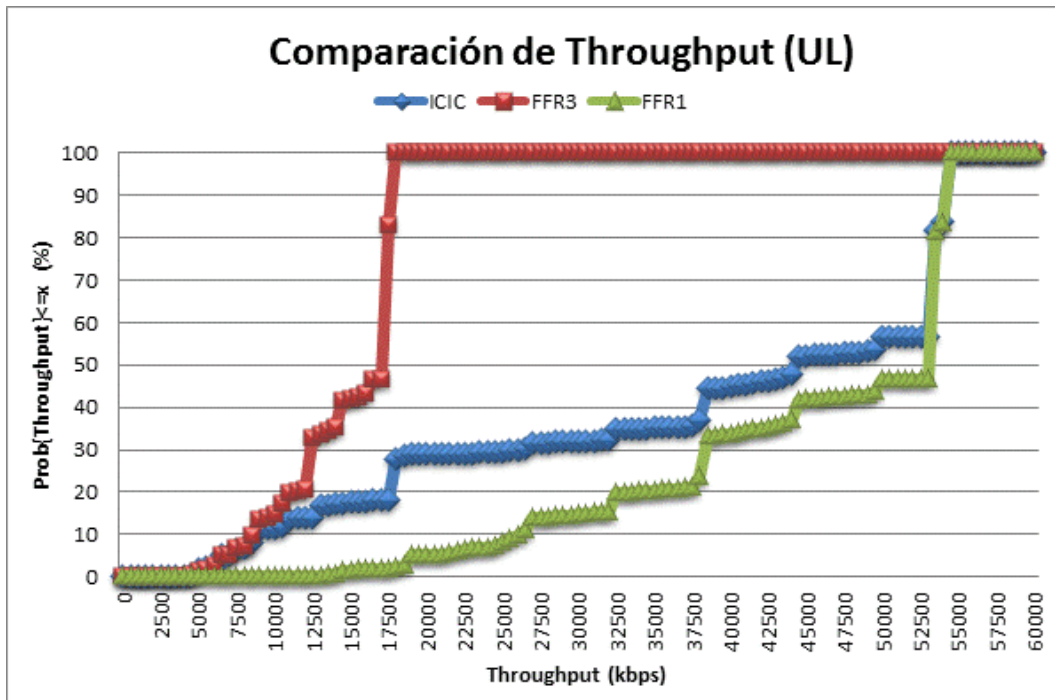


Figura V.7: Comparación del *Effective RLC Channel Throughput* en ICIC, FFR3 y FFR1 para el uplink

Fuente: Elaboración Propia

Para comprender la forma en que Atoll generó estos resultados, para cada una de los casos planteados, se buscaron las fórmulas de cada tipo de estudio en [6]. Una introducción de la nomenclatura y abreviaciones utilizadas en las fórmulas se explica en el APÉNDICE A.

Posteriormente se analizaron los resultados con respecto a la $C/(I+N)$ y el *throughput*, cuyas fórmulas para ambos enlaces se exponen en el APÉNDICE B y el APÉNDICE C respectivamente.

Para los estudios de *throughput* es importante mencionar que los resultados presentados corresponden con el máximo *throughput* alcanzable del canal en la capa RLC, utilizando el *bearer* más alto disponible en cada píxel del mapa y tomando en cuenta los errores debido a retransmisiones.

V.1.1 PDSCH $C/(I+N)$ (DOWNLINK)

Observando el comportamiento de cada curva de la Figura V.4 se puede apreciar claramente que la estrategia FFR3 es la que ofrece una mejor relación portadora a ruido más interferencia, dado que presenta valores inferiores a 2dB en apenas el 2.55% del total de la zona de estudio, en cambio FFR1 e ICIC presentan 37.28% y 25.54% respectivamente. De la misma forma FFR3 alcanza valores inferiores a 10dB en el 54.27%, mientras que entre FFR1 e ICIC los valores son muy similares, siendo estos iguales a 94.66% y 93.05% respectivamente, representando casi la totalidad de la zona de estudio.

Cabe destacar que a la hora de realizar estos cálculos Atoll enfoca el estudio únicamente a nivel de subportadora. Entre las razones del comportamiento de las curvas mostradas se pueden mencionar:

Para FFR3 la interferencia total disminuye gracias a la combinación de reuso frecuencial con la planificación de frecuencias³, obteniendo una reducción considerable de la interferencia co-canal, y a pesar de que aumente la interferencia de canal adyacente se logra que la suma total de interferencias sea mucho menor en comparación a los casos FFR1 e ICIC.

Otro factor que afecta el comportamiento de $C/(I+N)$ está relacionado con la potencia de transmisión de cada celda, cuyo valor es el mismo (40dBm) para todos los casos planteados, esto origina las siguientes situaciones: para FFR3, al estar una misma potencia concentrada en un ancho de banda menor se produce un aumento de energía por recurso elemental (EPRE), lo que se traduce a su vez en un incremento de $C/(I+N)$. Ocurre lo contrario para FFR1, dado que cada celda utiliza un ancho de banda mayor, existe entonces una mayor cantidad de recursos elementales, lo que originan que la energía correspondiente a cada una de ellas sea menor, reduciéndose así la $C/(I+N)$. Para el caso de ICIC se puede observar que es levemente mejor al caso de FFR1, pero no logra alcanzar los valores de FFR3, esto se debe a que la energía por recurso elemental es igual a la del esquema FFR1, pero las mejores ocurren principalmente por los usuarios de borde de celda ya que al solamente utilizar un tercio de la banda logran disminuir las interferencias de toda la red en general.

V.1.2 PUSCH $C/(I+N)$ (UPLINK)

Para el canal PUSCH de la Figura V.5 se observa que los 3 casos se comportan prácticamente igual, lo que se puede traducir en que la interferencia presente es prácticamente despreciable, por lo tanto se considera que este enlace bajo las condiciones establecidas, se encuentra limitado por ruido únicamente.

Además es importante mencionar que durante el proceso de simulación, el valor de potencia empleado por el terminal de prueba configurado para cada píxel del estudio

³ Planificación de frecuencia lograda utilizando los 3 canales de 5MHz usando el AFP de Atoll.

(en las predicciones realizadas es MIMO) es el mínimo necesario para poder alcanzar valores dentro del umbral de selección de el *radio bearer* que se le haya sido asignado por el *scheduler*, es decir, que dependiendo de la configuración que posea el *scheduler* en Atoll, se podrían dar resultados distintos de $C/(I+N)$ pero cuyas pruebas se salen de los objetivos de este proyecto.

En este caso el *scheduler* utilizado es de tipo *Round Robin* y por lo tanto la asignación de recursos (bloques frecuenciales) que posee por defecto en Atoll tiene el objetivo de asignar el mejor *radio bearer* posible, entendiendo por mejor, como aquél que posea una mayor eficiencia espectral. Esto implica que la cantidad de recursos que se le asignan a cada píxel varía y tiene como propósito obtener el mayor valor de $C/(I+N)$ posible. Por ejemplo, si para un usuario se asignan 5 bloques frecuenciales y el móvil es capaz de acceder al mejor *bearer*, y usando 6, sólo es capaz de acceder al segundo mejor, entonces se le serán asignados nada mas 5 bloques.

V.1.3 EFFECTIVE RLC CHANNEL THROUGHPUT (DOWNLINK)

En la Figura V.6 se muestra el comportamiento de las curvas *Effective RLC Channel Throughput* para los casos ICIC, FFR3 y FFR1 en el *downlink*. Para facilitar el análisis se ha creado una tabla con algunos resultados obtenidos al realizar la gráfica como se exhibe en la Tabla V.3.

<i>Throughput (x)</i> (<i>kbps</i>)	Prob(<i>Throughput</i>)<(x) (%)		
	ICIC	FFR3	FFR1
2500	5.77	1.45	2.73
5000	25.08	29.15	10.95
10000	53.85	78.09	48.73
12500	81.14	82.87	79.4
19000	95.60	100	95.38
57500	100	100	100

Tabla V.3: Probabilidad de *throughput* por porcentaje de zona de estudio

En ella se observa que para FFR3 se obtienen los mejores resultados, como por ejemplo *throughput* iguales o inferiores 2500kbps se consiguen en un 1.45% de los píxeles, lo que se traduce en que el resto de píxeles de la zona de estudio se obtienen velocidades superiores a esta. Lo mencionado se puede atribuir al hecho que, a pesar de que en la estrategia FFR3 se tengan menos recursos por celda se consiguen mejores niveles de C/I+N y por ende se utilizan radio *bearers* más eficientes, lo que deriva en un mayor *throughput* en comparación a los otros dos esquemas en los que sucede lo contrario, es decir, se tienen más recursos por celda pero se utilizan *bearers* menos eficientes.

Asimismo se puede observar como la curva FFR3 crece de forma más abrupta para valores superiores a 4000kbps, en cambio las curvas de ICIC y FFR1 lo hacen más lentamente. Comparando los resultados entre estas dos últimas estrategias se puede constatar que la estrategia ICIC alcanza resultados de *throughput* inferiores para un mayor porcentaje del área de estudio, como se observa en la Tabla V.3 para 5000 y 10000kbps. Esto se debe principalmente a que en ICIC los usuarios de borde de celda tienen un tercio de los recursos en comparación a los de FFR1, por lo que su *throughput* se ve disminuido en esta misma proporción. De igual forma se observa que las curvas de ICIC y FFR1 obtienen resultados similares a partir de los 12500kbps, correspondiente, en el caso ICIC, a los usuarios de centro de celda, los cuales son los únicos que pueden alcanzar estos valores.

Por último se puede observar la limitación en el *throughput* máximo de cada estrategia, la cual se refleja en las últimas dos filas de resultados de la Tabla V.3, en los que se logra cubrir el 100% de la zona de estudio para velocidades iguales o inferiores a 19000kbps para FFR3, en cambio para ICIC y FFR1 el mismo resultado se logra para velocidades de 57500kbps correspondiente aproximadamente a 3 veces el necesitado en FFR3.

V.1.4 EFFECTIVE RLC CHANNEL THROUGHPUT (UPLINK)

Para poder analizar el *Effective RLC Channel Throughput (Uplink)*, debido a que en [6] no se especifica qué fórmula es utilizada por Atoll para generar los resultados cuando se emplea ICIC, fue necesario hacer un estudio previo sobre los valores obtenidos en una de las simulaciones, comparando los casos de FFR1 e ICIC. La razón por la que se utiliza únicamente una de las diez simulaciones, se debe a que dentro de las propiedades de la simulación existe una pestaña denominada *Mobile* en la que se encuentra información específica para cada usuario generado en la simulación.

En primer lugar se parte de la ecuación principal para la velocidad de pico del canal RLC en el *uplink* que se muestra en (1).

$$CTP_{P-UL}^{M_i} = \frac{R_{UL}^{TX_i(ic)} \cdot \eta_{B_{UL}^{M_i}}}{D_{Frame}} \quad (1)$$

En ella, el término $R_{UL}^{TX_i(ic)}$ indica la cantidad de recursos que posee la celda para el *uplink*; $\eta_{B_{UL}^{M_i}}$ representa la eficiencia del *bearer* asignado al usuario y D_{Frame} es la duración de la trama. A partir de esta ecuación se obtiene la velocidad efectiva como se muestra en (2), donde el término BLER (*Block Error Rate*), es la relación entre el número de bloques con errores y el número de bloques totales, y depende de la relación portadora a interferencia más ruido que percibe la celda que provee de servicio al usuario.

$$CTP_{E-UL}^{M_i} = CTP_{P-UL}^{M_i} \cdot (1 - BLER(B_{UL}^{M_i})) \quad (2)$$

Por lo tanto, se utilizaron los resultados obtenidos en las simulaciones (los cuales serán analizados con mayor profundidad posteriormente), considerando únicamente la simulación 0 de los casos FFR1 e ICIC, en los que se indican valores de velocidad de pico RLC y radio *bearer* utilizado por usuario, lo cual unido al hecho de que ambas simulaciones se generaron en base a la misma semilla (lo que origina una misma

distribución de usuarios para ambos casos) permitieron comparar las características de un mismo usuario para las dos estrategias.

Asimismo fue necesario cerciorarse de que algunos de los usuarios estudiados se encontrasen en zona ICIC, para ello bastó con evaluar las diferencias de *Path Loss*⁴ entre el mejor servidor y el segundo mejor (*Delta Path Loss*) hasta conseguir algunos con valores inferiores a 3dB.

Una vez seleccionado los usuarios se procedió a determinar la relación entre la cantidad de recursos $R_{UL}^{TX_i(ic)}$ en simulaciones FFR1 e ICIC. Para ello se despejó de la formula (1) el valor $R_{UL}^{TX_i(ic)} / D_{Frame}$ para ambos casos para después dividir entre sí las cantidades obtenidas. Los resultados se pueden observar en la Tabla V.4.

User	Delta Path Loss	Estrategia	$CTP_{P-UL}^{M_i}$	$\eta_{B_{UL}}^{M_i}$	$\frac{R_{UL}^{TX_i(ic)}}{D_{Frame}}$	$\frac{R_{UL-ICIC}^{TX_i(ic)}}{R_{UL-FFR1}^{TX_i(ic)}}$
536	5.61	FFR1	54258.31	5.5547	9768	1
		ICIC	54258.31	5.5547	9768	
803	0.74	FFR1	18696.93	1.9141	9768	1/3
		ICIC	4807.81	1.4766	3256	
927	0.78	FFR1	44184.57	4.5234	9768	1/3
		ICIC	14728.19	4.5234	3256	

Tabla V.4: Relación entre la cantidad de recursos utilizados en FFR1 e ICIC para tres usuarios. (Uplink)

En dicha tabla se aprecia, que el usuario 536 presenta un *Delta Path Loss* superior a 3dB, por lo tanto no pertenece a la zona ICIC de ninguna celda, hecho que se refleja en el resultado de la relación obtenida que es igual a 1, esto se traduce en que para ambas estrategias se utiliza la misma cantidad de recursos para usuarios que estén en zonas no-ICIC.

⁴ Esta información también aparece en los resultados de la simulación.

En cambio para los usuarios 803 y 927 que se encuentran dentro del borde de la celda, se observa que a pesar de que varíe el radio *bearer* utilizado (usuario 803) o se mantenga igual para ambas estrategias (usuario 927), la cantidad de recursos que tienen es un tercio en comparación a los usuarios No-ICIC y FFR1.

Una vez determinado este hecho, se puede afirmar que las diferencias que existen entre las curvas de la parte inferior de la Figura V.7, (recordando que para los 3 casos se obtuvo una $C/(I+N)$ sumamente parecida) se deben a las distintas cantidades de recursos que administran las celdas para cada una de las estrategias.

V.2 ICIC Y ESQUEMAS DE REÚSO DE FRECUENCIA EN SIMULACIONES

En este punto se estudia con detalle algunos de los resultados más resaltantes obtenidos en las simulaciones para los casos FFR3, ICIC y FFR1 creados previamente; recordando que en Atoll las predicciones (como las realizadas en el punto anterior) solamente toman en cuenta valores asociados al tráfico resultante de las simulaciones⁵ para ambos enlaces, por lo tanto no aportan información sobre elementos asociados a los servicios como: número de usuarios conectados, usuarios rechazados, razones de rechazo, tipo de servicio y *throughput* de cada usuario en ambos enlaces, estado de la conexión, entre otros.

V.2.1 DISTRIBUCIÓN DE USUARIOS SEGÚN EL ESTADO DE CONEXIÓN

En la Tabla V.5 se observa la distribución de usuarios según el estado de la conexión, obtenida a partir del promedio del total de las 10 simulaciones realizadas, para cada una de las estrategias. Los usuarios se consideran conectados en caso de presentar una conexión activa en cualquiera de los dos enlaces o inclusive en ambos (*Connected*

⁵ En caso de que las predicciones estén basadas en simulaciones y no en la información de la tabla de celdas.

DL, *Connected UL* y *Connected DL+UL*). Por el contrario, pueden considerarse no conectados (rechazados) por diversos motivos: inactividad (*Inactive*); falta de cobertura (*No Coverage*); no alcanzar una $C/(I+N)$ suficiente para utilizar el radio *bearer* en el sentido en que desea conectarse, o que la capacidad de *throughput* del terminal (dependiente de su categoría) no sea suficiente como para alcanzar el mínimo *throughput* demandado por el usuario (*No Service*); el móvil no es seleccionado por el *scheduler* para la asignación de recursos (*Scheduler Saturation*); todos los recursos de la celda fueron usados para los demás usuarios, o porque el mínimo *throughput uplink* es superior al *throughput* alcanzado utilizando los recursos asignados al usuario (*Resource Saturation*).

Estado	Número de Usuarios (Promedio)		
	ICIC	FFR3	FFR1
Conectados	1279.2	1279.4	1278
<i>Connected DL</i>	758.8	758.9	758
<i>Connected UL</i>	332.4	332.4	332.4
<i>Connected DL+UL</i>	188	188.1	187.6
No Conectados	85.8	85.6	87
<i>Inactive</i>	85.5	85.5	85.5
<i>No Coverage</i>	0	0	0
<i>No Service</i>	0.3	0.1	1.5
<i>Scheduler Saturation</i>	0	0	0
<i>Resource Saturation</i>	0	0	0
Total de Usuarios	1365	1365	1365

Tabla V.5: Distribución de usuarios en promedio según el estado de conexión para ICIC, FFR3 y FFR1

Analizando los resultados de la Tabla V.5 se observa que el mayor número de usuarios conectados en promedio se obtiene para FFR3, y que para las tres estrategias la cantidad de usuarios conectados en el *downlink* es casi el doble de los conectados en el *uplink*.

Las pequeñas diferencias existentes entre las estrategias se deben al número de usuarios rechazados en el *downlink*, considerados con un estado de tipo *No Service*.

Examinando los resultados de una simulación en concreto (del total de 10 simulaciones realizadas por estrategia), se pudo reconocer que dicho estado era generado por aquellos usuarios que alcanzaban un valor de $C/(I+N)$ en el *downlink* inferior al requerido para conectarse. Esta condición sucede en mayor medida para la estrategia FFR1 y en menor medida para FFR3, reflejándose el beneficio de emplear estrategias que reduzcan el impacto de las interferencias, permitiendo así una mayor cantidad de usuarios conectados.

Estos resultados, marcan la tendencia del comportamiento de la red para cada estrategia, por lo tanto, en caso de que se desee observar diferencias más importantes, sería necesario elevar el número de usuarios totales.

V.2.2 DISTRIBUCIÓN DE USUARIO POR SERVICIO EN USO

En este estudio se describe la distribución de los usuarios según el servicio que estén utilizando, basándose en el promedio de las 10 simulaciones para cada estrategia. Además se indican los valores de *Peak y Effective RLC Aggregate Throughput*, correspondiente con la suma de todos los *throughput* de pico y efectivo de usuario respectivamente según el enlace y el tipo de servicio que utilicen. La distribución se observa en la Tabla V.6.

Analizando la tabla se observa que el servicio más utilizado por los usuarios de la red es el de navegación web (*Web Browsing*), seguido por el servicio de voz (VoIP), y por último los servicios de FTP (*FTP Downloading*) y video conferencia (*Video Conferencing*) en este orden.

Asimismo es posible apreciar la asimetría que existe entre los *throughput* por servicio requerido en cada enlace. Especialmente en los servicios *Web Browsing* y FTP, siendo más relevante el primero debido a la gran cantidad de usuarios que emplean este servicio, aunque es importante destacar que la relación entre el *throughput* requerido y el número de usuarios por servicio es mucho mayor en el caso FTP. Este hecho se traduce en un desequilibrio de los recursos requeridos para cada enlace.

Examinando los resultados para el *uplink* se puede afirmar que los usuarios de dicho enlace experimentan prácticamente las mismas velocidades de pico y efectiva por servicio para cualquiera de las tres estrategias, en cambio en el *downlink*, las diferencias de velocidades de pico ocurren en mayor medida para el servicio *Web Browsing*, y con respecto a las velocidades efectivas, las diferencias se reflejan tanto en FTP como en *Web Browsing*, siendo más evidente dicha discrepancia entre las estrategias FFR1 y FFR3. La razón por la que los *aggregate throughputs* de las tres estrategias obtenidos sean prácticamente iguales se debe a que en todas ellas la mayoría de usuarios logran alcanzar los *throughputs* demandados y las pequeñas diferencias que existen se deben a aquellos usuarios considerados como *No Service* del punto anterior.

-

		ICIC				FFR3				FFR1				
		FTP	Video Conf.	VoIP	Web Brow sing	FTP	Video Conf.	VoIP	Web Brow sing	FTP	Video Conf.	VoIP	Web Brow sing	
Usuarios (% conectados)		46.6 (100%)	22.1 (74.4%)	420.5 (84.3%)	790 (100%)	46.6 (100%)	22.1 (74.4%)	420.7 (84.4%)	790 (100%)	46.5 (99.8%)	22.1 (74.4%)	420.1 (84.2%)	789.3 (99.9%)	
Usuarios por Estado		DL	22.3	6.9	129	600.6	22.3	6.9	129.1	600.6	22.2	6.9	129	599.9
		UL	24.2	7.8	113.8	186.6	24.2	7.8	113.8	186.6	24.2	7.8	113.8	186.6
		DL+ UL	0.1	7.4	177.7	2.8	0.1	7.4	177.8	2.8	0.1	7.4	177.3	2.8
Agg. Throughput (Mbps)	DL	Peak	22.87	0.92	3.74	77.24	22.88	0.92	3.74	77.24	22.84	0.92	3.74	77.15
		Eff.	22.48	0.90	3.67	75.68	22.57	0.90	3.68	76.18	22.34	0.90	3.66	75.65
	UL	Peak	3.11	0.97	3.56	12.12	3.11	0.97	3.56	12.12	3.11	0.97	3.55	12.12
		Eff.	3.07	0.96	3.51	11.98	3.07	0.96	3.51	11.98	3.06	0.96	3.51	11.97

Tabla V.6: Distribución de usuarios por servicio para ICIC, FFR3 y FFR1

V.2.3 CARGA DE TRÁFICO DE LAS CELDAS

En este punto se analiza la carga de tráfico que presentan las celdas, definida como la relación entre los recursos usados y los recursos totales, para ambos enlaces según la estrategia utilizada. A través de la información de la carga de cada celda, obtenida del promedio de los resultados de las 10 simulaciones, se crearon histogramas y funciones de distribución acumulativa para cada uno de los casos como se muestra en las Figura V.8 y Figura V.9.

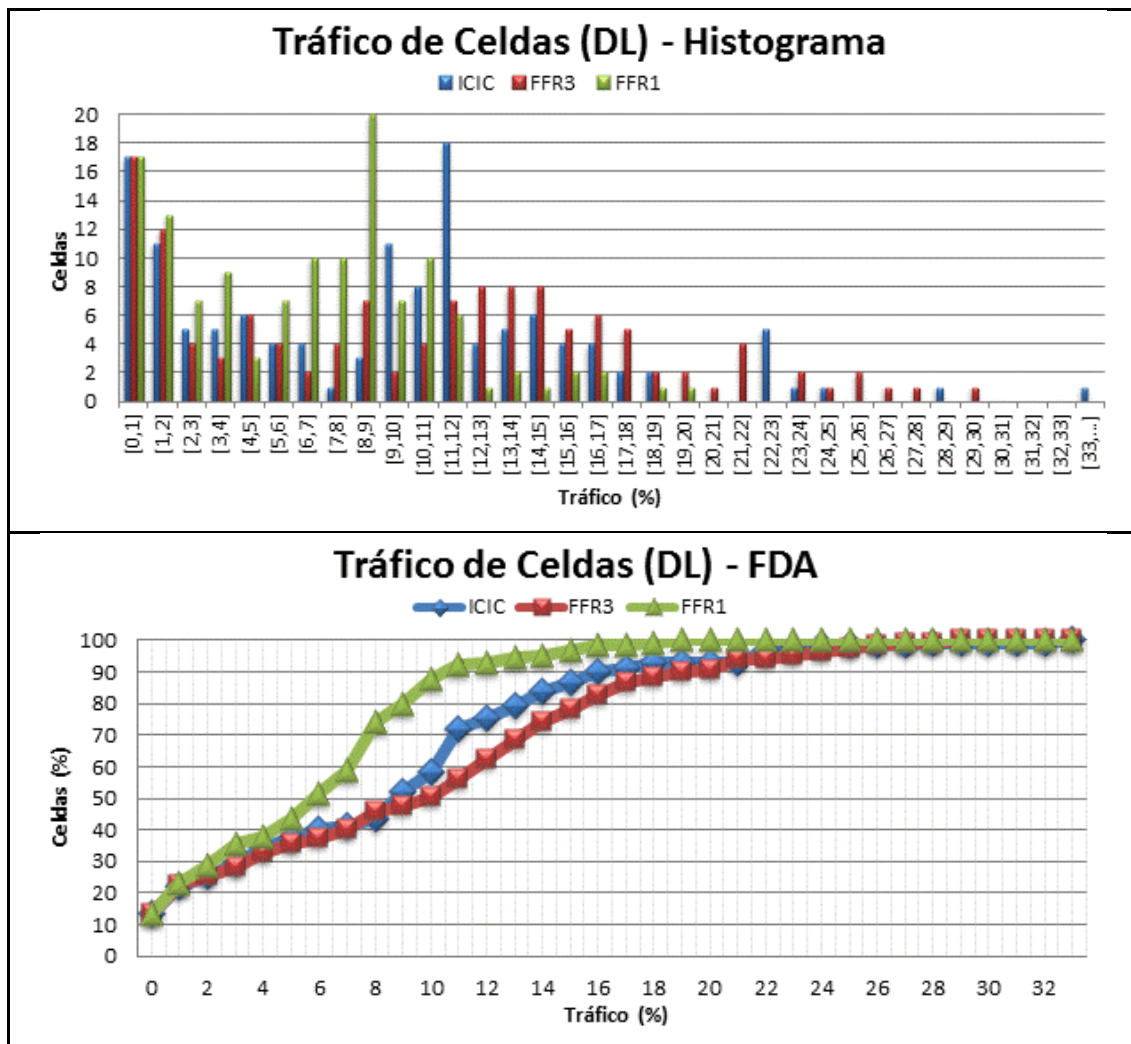


Figura V.8: Carga de Tráfico de Celdas *Downlink*
Fuente: Elaboración Propia

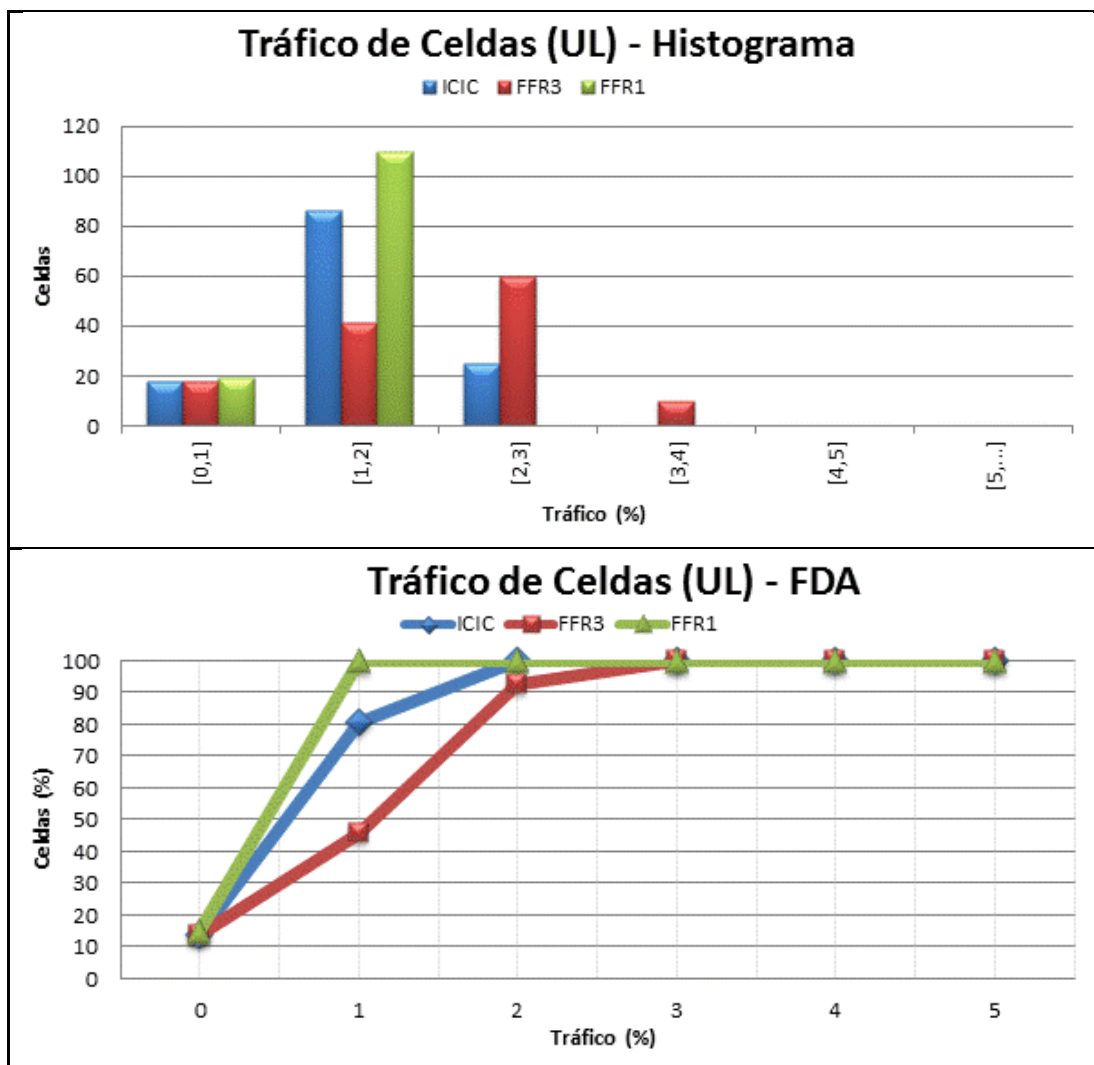


Figura V.9: Carga de Tráfico de Celdas *Uplink*
Fuente: Elaboración Propia

Es importante resaltar que en los resultados para ambos enlaces existen 17 celdas (13%) que no presentan ningún tipo de tráfico, pero que igual fueron incluidos en los resultados por ser parte de la red. Estas celdas están ubicadas en su mayoría en las afueras de la zona de estudio, o bien pueden ser parte de un *site* que se encuentre en el borde de dicha zona pero que cuya orientación apunta hacia la parte externa de la misma.

Para el caso *downlink*, en el gráfico de histograma de la Figura V.8, se observa la baja carga de tráfico que se presenta para cada estrategia, siendo el máximo alcanzado en

ICIC con un valor entre 32-33% en una única celda. También se observa como la mayoría de celdas presenta un tráfico inferior al 20% para todas las estrategias.

Asimismo en la función de distribución de la Figura V.8 se observa que el 90% de las celdas en FFR3 presentan un porcentaje de tráfico inferior al 20%, en cambio en ICIC y FFR1 se alcanzan valores de 16% y 10,5% respectivamente. Por lo tanto se puede afirmar que la estrategia que percibe una mayor carga de tráfico es la FFR3, seguido de ICIC y por último FFR1. La razón de este comportamiento se atribuye al hecho de que en FFR1, dado que todas las celdas utilizan todos los recursos del canal sin restricciones, es posible atender a los usuarios de la red actual con una relación recursos-ocupados/recursos-totales inferior a la de las otras dos estrategias, a pesar de tener peores condiciones radios debido a las interferencias. Esto significa que, tanto para ICIC como para FFR3, el hecho de sacrificar los recursos (en todas las celdas de FFR3 y solo para el borde de celda en ICIC) con el fin de mejorar las condiciones del canal a través de la disminución de interferencias y de esta forma lograr un uso más eficiente de cada recurso (con radio *bearers* de mayor eficiencia espectral) no es suficiente como para obtener una carga de tráfico inferior al obtenido en FFR1.

Asimismo se observa para el caso *uplink*, en la parte de histograma de la Figura V.9, que la mayor carga de tráfico entre el 3-4% se presenta para la estrategia FFR1 en un total de 10 celdas. De igual forma se observa que en la función de distribución el comportamiento entre las curvas de cada estrategia es el mismo que para el *downlink*. Por último, el hecho de que ninguna estrategia alcance a superar el 4% de carga de tráfico en ninguna celda, respalda el resultado obtenido en V.1.2 que indica que el comportamiento de $C/(I+N)$ en las tres estrategias es sumamente similar, lo cual se puede atribuir a la poca interferencia que se genera debido al bajo uso de los recursos de este enlace.

V.2.4 ASIGNACIÓN DE RADIO BEARER

A continuación se estudian los radio *bearers* (RB) asignados a los usuarios de la simulación 0 (del total de 10 simulaciones realizadas) para cada una de las

estrategias. La razón por la que se utiliza únicamente una de las diez simulaciones, al igual que en casos anteriores, se debe a que dentro de las propiedades de la simulación existe una pestaña denominada *Mobile* en la que se encuentra información específica para cada usuario generado en la simulación. Entre dicha información está el tipo de RB asignado. Mientras que las estadísticas promedio de un grupo de simulaciones no puede contener esta información porque los móviles varían de una simulación a otra.

Las características de los RB configurados por defecto en Atoll se encuentran en la Figura V.10.

Radio Bearer Index	Name	Modulation	Channel Coding Rate	Bearer Efficiency (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

Figura V.10: Características de los Radio Bearer por defecto en Atoll
Fuente: Elaboración Propia

A pesar de que en Atoll exista un tipo de predicción que permite calcular los radio *bearer* en cada pixel del terreno, se decidió continuar la línea de estudio con respecto a los resultados que se obtienen directamente a partir de las simulaciones pues la predicción no tiene en cuenta los posibles servicios ni la dirección en la que se estén utilizando; de esta forma se procedió a evaluar únicamente a aquellos RB que hayan sido asignados a los usuarios, y que estén siendo utilizados en el mismo enlace (*downlink* o *uplink*) que el servicio activo que presente dichos usuarios¹. Los resultados de la asignación se observan en la Figura V.11 y Figura V.12.

¹ Durante las simulaciones de Atoll, en caso de que un usuario utilice un servicio en un único enlace (DL o UL), igual se le asigna un radio *bearer* para el otro enlace.

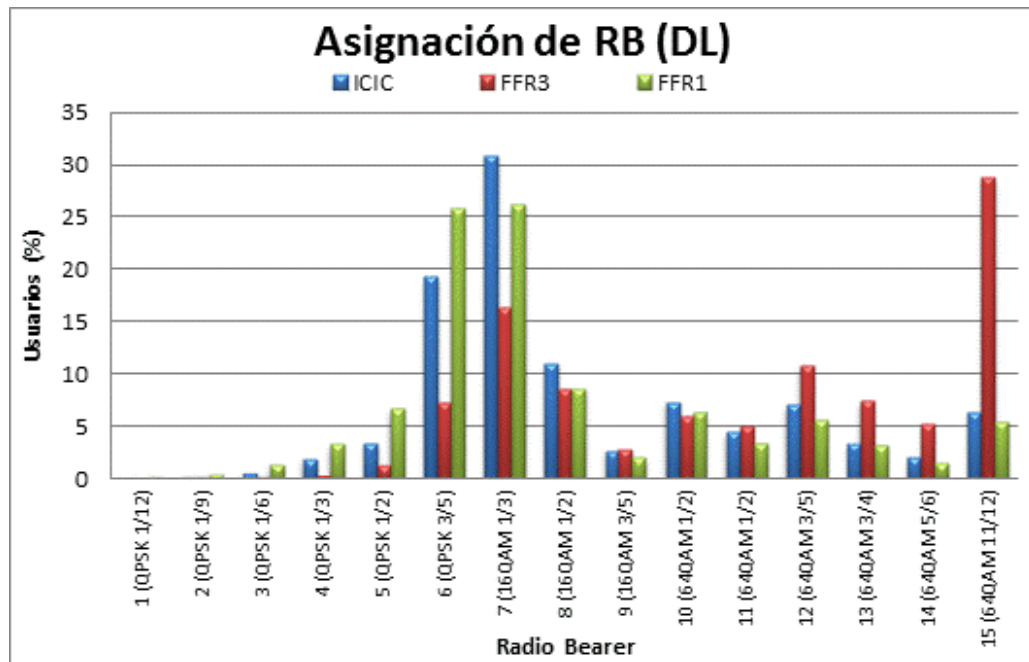


Figura V.11: Asignación de Radio Bearer en la simulación 0, para ICIC, FFR3 y FFR1 en el Downlink

Fuente: Elaboración Propia

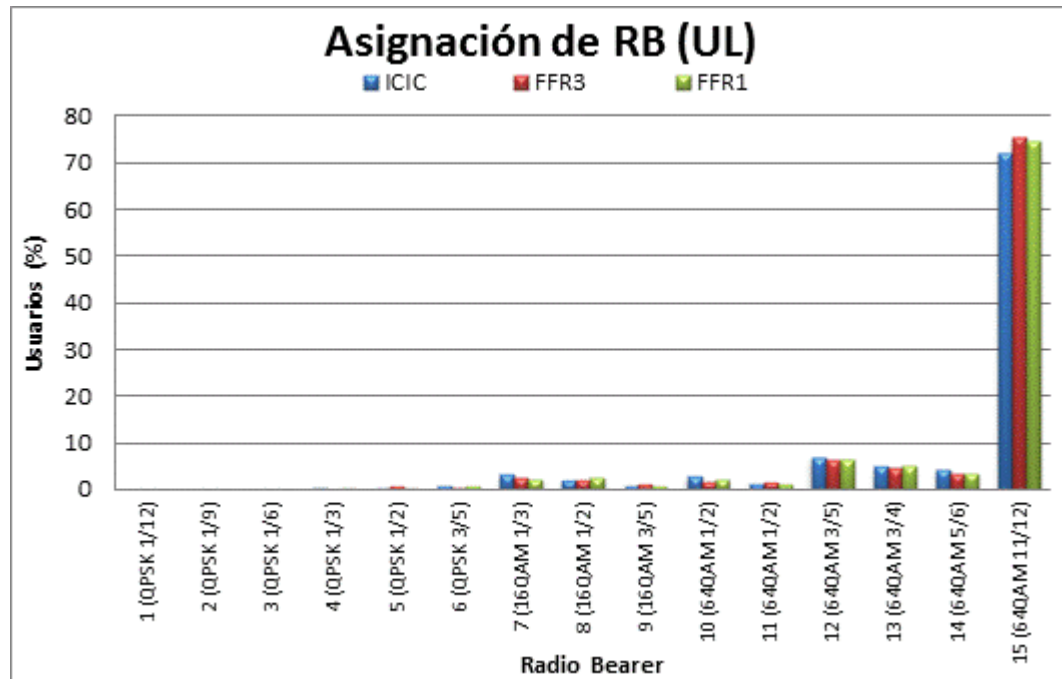


Figura V.12: Asignación de Radio Bearer en la simulación 0, para ICIC, FFR3 y FFR1 en el Uplink

Fuente: Elaboración Propia

Para el *downlink* se puede observar claramente como en FFR3 existe un mayor porcentaje de usuarios (en comparación a las otras dos estrategias) que logran alcanzar los radio *bearer* de mayor eficiencia espectral, como los comprendidos entre 11 y 15. Asimismo al comparar ICIC con FFR1 se observa que el primero tiene un porcentaje superior de usuarios utilizando los RB desde el 9 hasta el 15 (aproximadamente 1%), y que dicha tendencia se mantiene, con un porcentaje aún mayor hasta el radio *bearer* 6 en donde el comportamiento cambia siendo FFR1 superior. Es decir que con ICIC los usuarios usan RBs más eficientes que con FFR1.

De la misma forma, para el enlace *uplink*, se aprecia como FFR3 presenta un porcentaje más alto de usuarios que utilizan el RB más eficiente posible. En cambio, al comparar las otras dos estrategias, se observa el efecto que causa utilizar ICIC en un enlace en el que no es necesario hacerlo (dado que las interferencias son despreciables), ocasionando una disminución del porcentaje de usuarios que alcanzan el RB 15.

V.3 APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA ICIC EN EL DOWNLINK, UPLINK, O AMBOS.

En este escenario se investiga el impacto que se genera sobre un sentido del enlace (*downlink* o *uplink*), cuando sobre el otro se utiliza la estrategia ICIC. Para realizar este estudio se crearon 2 grupos de 10 simulaciones, cada uno correspondiente con la opción ICIC activada en uno de los dos enlaces, para luego ser utilizadas como carga de tráfico en las predicciones cuyas configuraciones se observan en la Tabla V.7.

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
25	Coverage by C/(I+N) Level (DL)	ICIC DL	PDSCH C/(I+N) Level (DL) Value Intervals: 30:-1:-20
27		ICIC UL	
26	Coverage by C/(I+N) Level (UL)	ICIC DL	PUSCH C/(I+N) Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
28		ICIC UL	
Para los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>MIMO</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>Web Browsing</i> y <i>Shadowing</i> de 80%.			

Tabla V.7: Estudios de C/(I+N) utilizando ICIC UL e ICIC DL

Para poder tener una mejor referencia a la hora de comparar se agregaron a los resultados de estas predicciones, mostradas en la Figura V.13 y Figura V.14, las curvas correspondientes a FFR1 e ICIC utilizadas anteriormente, la primera debido a que representa el comportamiento de la red al no utilizarse ICIC en ninguno de los enlaces y la segunda porque representa exactamente lo opuesto, es decir, el comportamiento de ambos enlaces al utilizar ICIC en las dos direcciones.

Para el caso *downlink* se puede observar la correspondencia que existe entre las curvas ICIC UL y FFR1, esto demuestra que las celdas en las simulaciones ICIC UL al estar configuradas solamente para soportar ICIC en el *uplink*, se comportan en el enlace descendente de la misma forma que lo hace la estrategia FFR1. Asimismo en este enlace, se cumple que en ICIC DL e ICIC se obtienen los mismos resultados.

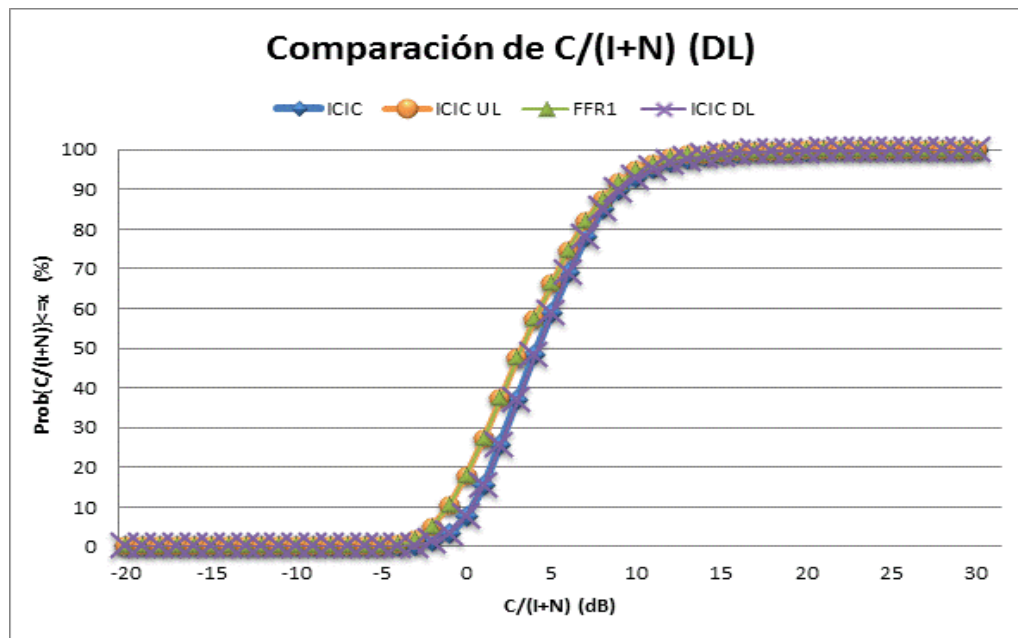


Figura V.13: Comparación del PDSCH C/(I+N) en ICIC, FFR1, ICIC UL e ICIC DL
Fuente: Elaboración Propia

Igualmente ocurre para el *uplink*, cuyos resultados para los 4 casos estudiados no varían. Por lo tanto se puede afirmar que los enlaces son independientes a la técnica de gestión de interferencias que se esté usando en el enlace opuesto, es decir, el hecho de que esté aplicado el ICIC en un enlace, no afecta los resultados que se obtienen en el otro.

Para corroborar este último argumento, se observaron también los resultados obtenidos al hacer el promediado de los grupos de 10 simulaciones para cada caso, los cuales se muestran en la Tabla V.8.

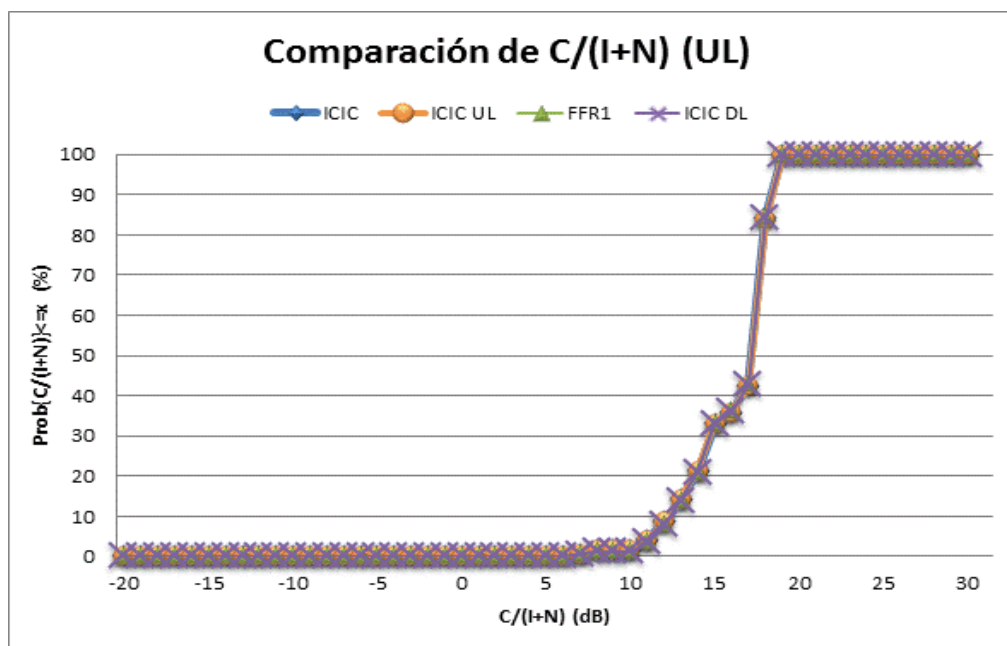


Figura V.14: Comparación del PUSCH $C/(I+N)$ en ICIC, FFR1, ICIC UL e ICIC DL
Fuente: Elaboración Propia

Estado	Número de Usuarios (Promedio)			
	ICIC	FFR1	ICIC DL	ICIC UL
Conectados	1279.2	1278	1279.2	1278
<i>Connected DL</i>	758.8	758	758.8	758
<i>Connected UL</i>	332.4	332.4	332.4	332.4
<i>Connected DL+UL</i>	188	187.6	188	187.6
No Conectados	85.8	87	85.8	87
<i>Inactive</i>	85.5	85.5	85.5	85.5
<i>No Coverage</i>	0	0	0	0
<i>No Service</i>	0.3	1.5	0.3	1.5
<i>Scheduler Saturation</i>	0	0	0	0
<i>Resource Saturation</i>	0	0	0	0
Total de Usuarios	1365	1365	1365	1365

Tabla V.8: Distribución de usuarios en promedio según el estado de conexión para ICIC, FFR1, ICIC UL e ICIC DL

En ella se observan que ICIC UL y FFR1 tienen los mismos valores, recordando que es en el enlace *downlink* en donde se presentaban usuarios con un estado de *No Service* debido al bajo nivel de $C/(I+N)$ que resultaba insuficiente para alcanzar el radio *bearer* requerido para conectarse, por lo que al utilizar solamente ICIC *uplink* no se estaría ayudando de ninguna forma a estos usuarios a reducir la interferencia que perciben en el enlace descendente y por ende los resultados serían iguales que los obtenidos para FFR1. Lo contrario ocurre para el caso ICIC *downlink*, ya que habilitando únicamente esta opción, se genera una disminución de la interferencia percibida por los usuarios en estado *No Service*, permitiendo su posible conexión al igual que ocurría para el caso ICIC.

V.4 VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE USUARIOS DE LA RED

Una vez analizados los resultados obtenidos en los puntos anteriores, se decidió recrear un nuevo escenario modificando la densidad de los usuarios de la red, para así poder comparar el comportamiento del sistema frente a estas variaciones empleando una configuración base (FFR1) o una estrategia de gestión de interferencias (ICIC en ambos enlaces). Es importante mencionar que en este estudio y en los realizados posteriormente, no fue incluida la estrategia de reuso de frecuencia FFR3 debido al bajo *throughput* y alta carga de tráfico que presentaba en comparación a FFR1 e ICIC, y que se vio reflejada principalmente en los resultados obtenidos en V.1.4 y 0.

Para realizar este escenario se modificó el factor de escala global de tráfico (*global scaling factor*), la cual es una opción que se encuentra habilitada al momento de crear las simulaciones y permite incrementar o disminuir la densidad de usuarios según el valor de factor que esté configurado, evitando así tener que alterar los mapas de tráfico o algún otro tipo de parámetro relacionado a este.

En total se crearon 4 grupos de 10 simulaciones para cada estrategia, con factores de escala iguales a 2, 3, 5 y 10. Una vez creadas se procedió a utilizarlas como carga de tráfico para las predicciones que se muestran en la Tabla V.9, obteniendo los resultados que se exhiben desde la Figura V.15 hasta la Figura V.19. Cabe destacar

que en dichas Figuras solo se muestra una sección de los resultados correspondientes a la parte en donde suceden los cambios más significativos en las curvas, para el resto de valores no mostrados el comportamiento permanece prácticamente constante hasta llegar a los extremos (-20, 30; ó 0, 60000 según el caso).

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display	ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
29	Coverage by C/(I+N) Level (DL)	ICIC x2	PDSCCH C/(I+N) Level (DL) Value Intervals: 30:-1:-20	37	Coverage by C/(I+N) Level (UL)	ICIC x2	PUSCH C/(I+N) Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
30		ICIC x3		38		ICIC x3	
31		ICIC x5		39		ICIC x5	
32		ICIC x10		40		ICIC x10	
33		FFR1 x2		41		FFR1 x2	
34		FFR1 x3		42		FFR1 x3	
35		FFR1 x5		43		FFR1 x5	
36		FFR1 x10		44		FFR1 x10	
45	Coverage by Throughput (DL)	ICIC x2	Effective RLC Channel Throughput (DL) Value Intervals: 60000:-500:0	53	Coverage by Throughput (UL)	ICIC x2	Effective RLC Channel Throughput (UL) Value Intervals: 60000:-500:0
46		ICIC x3		54		ICIC x3	
47		ICIC x5		55		ICIC x5	
48		ICIC x10		56		ICIC x10	
49		FFR1 x2		57		FFR1 x2	
50		FFR1 x3		58		FFR1 x3	
51		FFR1 x5		59		FFR1 x5	
52		FFR1 x10		60		FFR1 x10	
Para los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>MIMO</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>Web Browsing</i> y <i>Shadowing</i> de 80%.							

Tabla V.9: Estudios de C/(I+N) y Throughput utilizando ICIC y FFR1 (x2 , x3, 5 y x10)

V.4.1 PDSCH C/(I+N)

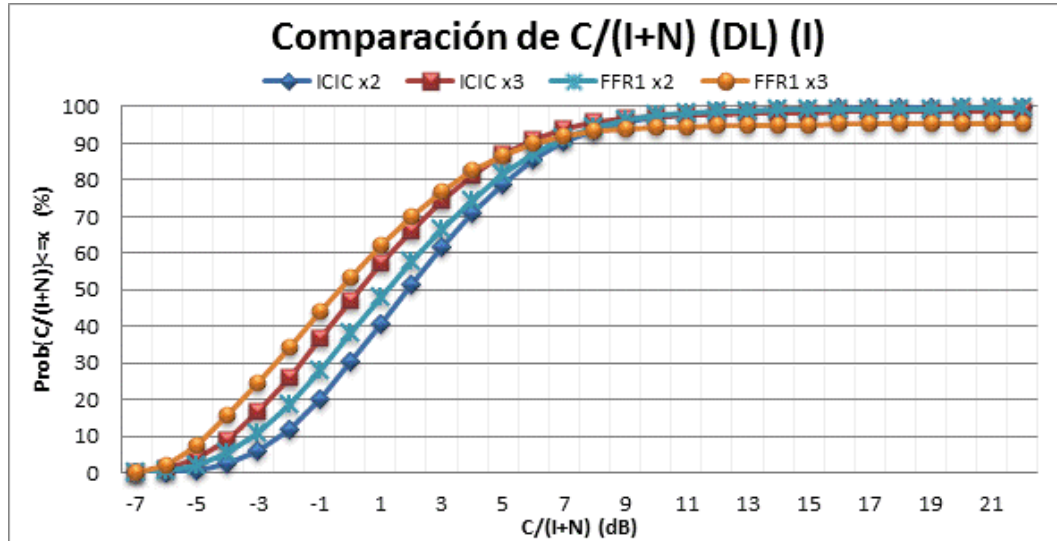


Figura V.15: Comparación del PDSCH C/(I+N) en ICIC y FFR1 (x2 y x3)
Fuente: Elaboración Propia

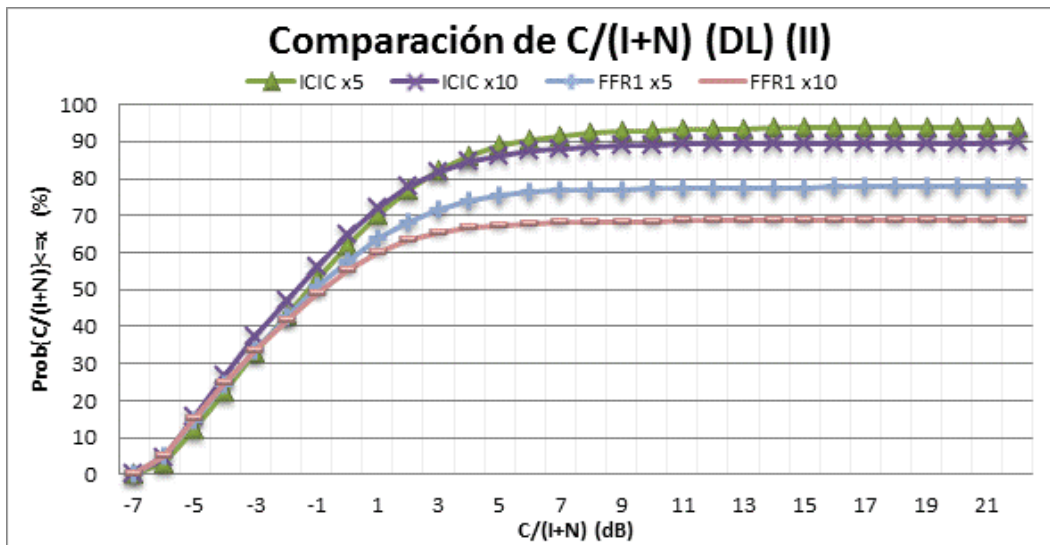


Figura V.16: Comparación del PDSCH C/(I+N) en ICIC y FFR1(x5 y x10)
Fuente: Elaboración Propia

Observando los resultados correspondientes al PDSCH (Figura V.15 y Figura V.16) se puede apreciar los beneficios que ofrece aplicar ICIC en el *downlink* para la red planteada. En primer lugar es necesario notar que no todas las curvas llegan al 100%,

esto se debe a que para hacer una comparación justa del rendimiento de cada combinación de ‘estrategia/densidad de usuario’ se utilizó como referencia el área total del terreno estudiado, lo que significa que aquellas combinaciones que no alcancen este valor máximo no son capaces de cubrir la totalidad de la zona de estudio y sólo cubren el porcentaje máximo reflejado en cada curva. Por lo tanto, al comparar las curvas ICIC y FFR1, para un valor de factor de escala fijo y un mismo porcentaje de zona cubierta, se logra apreciar que todas las de ICIC alcanzan un valor de $C/(I+N)$ más alto, a excepción del caso x10 en donde pareciera que FFR1x10 alcanzara una $C/(I+N)$ superior, lo cual es una consecuencia dada por el hecho de que ambas curvas no tienen el mismo máximo, es decir que cuando se cruzan las curvas FFR1 con las de ICIC (para un mismo factor de escala) no significa que las primeras sean mejor sino que mantienen su comportamiento con respecto a su máximo alcanzable. Es por esta misma razón que cuando se comparan los resultados para factores de escalas bajos (Figura V.15) las diferencias son evidentes ya que tienen como máximo valores muy cercanos. Por ejemplo, para un 50% de terreno se obtiene que la $C/(I+N)$ es igual o inferior a -0.5dB para FFR1x3, en cambio para ICICx3 se obtiene que es igual o inferior a 0.5dB.

Asimismo si se compara el efecto que tiene el aumento de la densidad de usuarios sobre el máximo alcanzable de cada combinación, se puede notar que se ven más perjudicadas las combinaciones con FFR1 que las de ICIC al observar el máximo de $C/(I+N)$, el ejemplo más evidente se da para el caso de x10 donde la curva de ICIC alcanza a cubrir hasta un 90% de la zona de estudio en cambio la de FFR1 apenas llega a un 69% aproximadamente.

V.4.2 PUSCH C/(I+N)

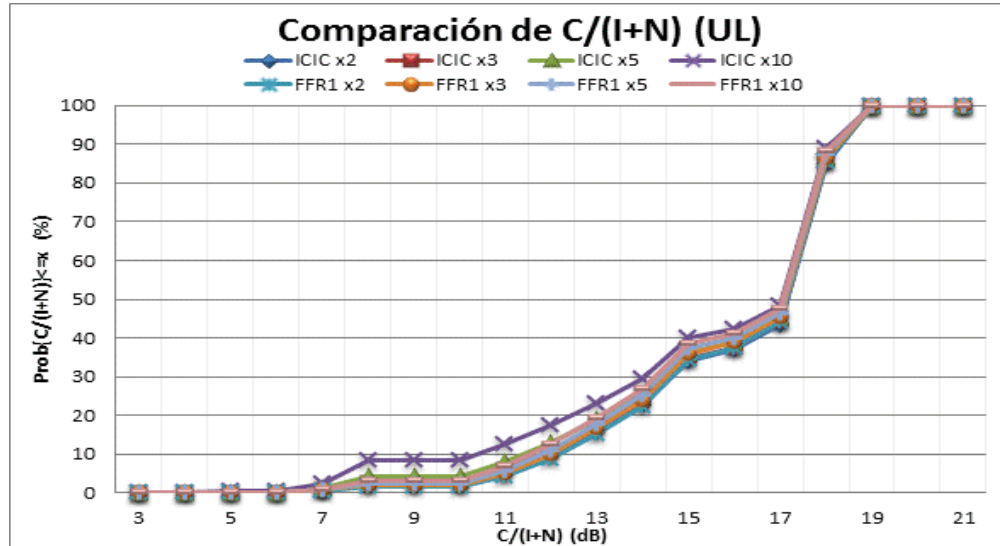


Figura V.17: Comparación del PUSCH C/(I+N) en ICIC y FFR1 (x2, x3, x5 y x10)
Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado para el *uplink*, se aprecia que las interferencias son tan bajas (inclusive para el caso de x10) que no existe necesidad alguna de utilizar ICIC, ya que lo único que logra es empeorar el rendimiento de la red.

V.4.3 EFFECTIVE RLC CHANNEL THROUGHPUT DOWNLINK UPLINK

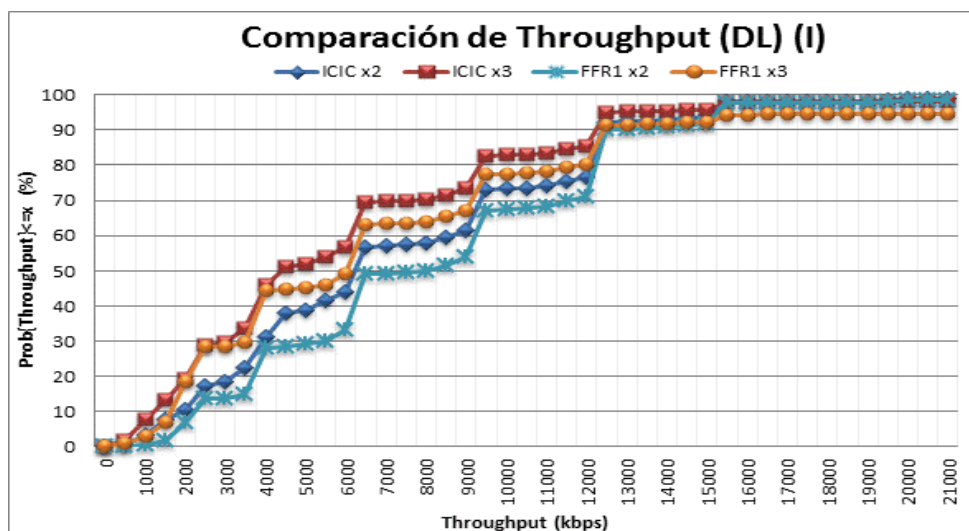


Figura V.18: Comparación del *Throughput Downlink* en ICIC y FFR1 (x2, x3)
Fuente: Elaboración Propia

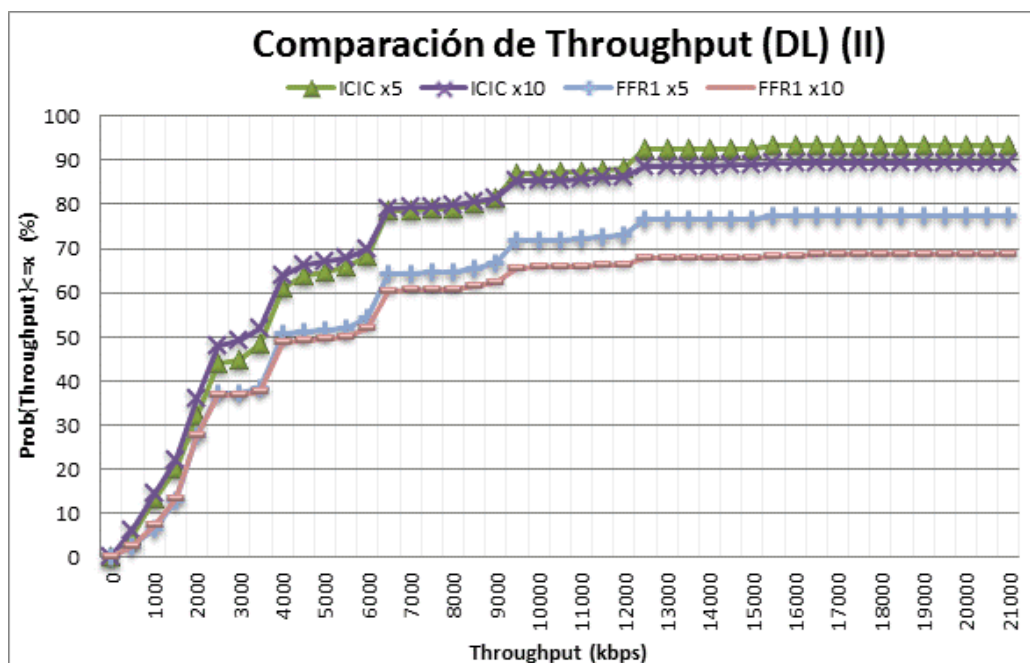


Figura V.19: Comparación del *Throughput Downlink* en ICIC y FFR1 (x5, x10)

Fuente: Elaboración Propia

Para el enlace descendente se observa como para cada una de las situaciones de densidad de usuarios estudiadas, el *throughput* logra mejores o iguales resultados para la estrategia FFR1 que para ICIC, la diferencia es más evidente cuando el factor de escala es relativamente bajo como en el caso x2 y x3, y a pesar de que existan diferencias entre el porcentaje total de la zona de estudio que cada uno cubre estas no superan el 7% aproximadamente. Por ejemplo para un 70% de los píxeles, en ICICx3 se alcanzan *throughputs* iguales o inferiores 8000kbps, mientras que para FFR1 son iguales o inferiores a 9250kbps.

Sin embargo, para valores de densidad de usuario más altos como el x5 y x10 se aprecia como el comportamiento es sumamente similar entre los casos de ICIC a pesar de que uno tenga el doble de densidad que el otro, en cambio para FFR1 el porcentaje disminuye (al igual que lo hacía en el caso de $C/(I+N)$ del punto anterior) debido a la limitación del máximo de terreno que llega a cubrir explicada anteriormente, obsérvese que los máximos alcanzables son iguales que en el estudio de $C/(I+N)$ para cada caso.

V.4.4 EFFECTIVE RLC CHANNEL THROUGHPUT UPLINK

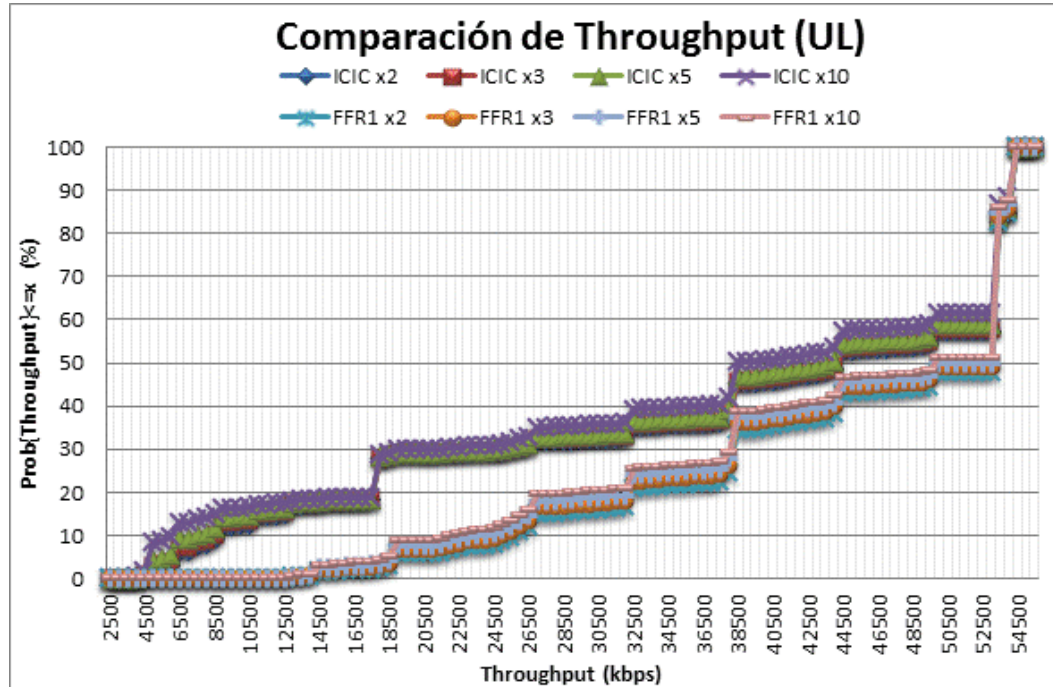


Figura V.20: Comparación del *Throughput Uplink* en ICIC y FFR1 (x2, x3, x5 y x10)

Fuente: Elaboración Propia

Asimismo para el enlace ascendente se repite el mismo patrón que en el estudio anterior, dado que la implementación de ICIC en dicho enlace para la red estudiada reduce notablemente el rendimiento del sistema para cualquier densidad de usuario estudiada hasta el momento. También es importante destacar que para todas las combinaciones realizadas, todas las curvas alcanzan a cubrir el 100% de la zona de estudio.

V.4.5 DISTRIBUCIÓN DE USUARIOS SEGÚN ESTADO DE CONEXIÓN (X2, X3, X5 Y X10)

Para este punto se procedió a comparar y analizar los resultados obtenidos a través de los promediados de los grupos de simulaciones creados anteriormente, agrupándolos según el factor de escala utilizado como se observa en la Tabla V.10

Estado	Número de Usuarios (Promedio)							
	ICIC x2	FFR1 x2	ICIC x3	FFR1 x3	ICIC x5	FFR1 x5	ICIC x10	FFR1 x10
Conectados (%)	2487.5 (93.4)	2485.3 (93.4)	3760.4 (93.5)	3755.5 (93.4)	6214.3 (93)	6202.8 (92.9)	11560.6 (85.7)	11689.6 (86.7)
<i>Connected DL</i>	1458.5	1456.8	2190.9	2187.6	3628.9	3629.9	6369.7	6524.4
<i>Connected UL</i>	654.9	654.9	999.4	999.4	1648	1648	3328.3	3328.5
<i>Connected DL+UL</i>	374.1	373.6	570.1	568.5	937.4	924.9	1862.6	1836.7
No Conectados (%)	174.6 (6.6)	176.8 (6.6)	260.9 (6.5)	265.8 (6.6)	464.6 (7)	476.1 (7.1)	1923.8 (14.3)	1794.8 (13.3)
<i>Inactive</i>	174.3	174.3	258.9	258.9	431.2	431.2	864.3	864.3
<i>No Coverage (%)</i>	0 (0)	0 (0)	0.1 (0)	0.1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>No Service (%)</i>	0.3 (0)	2.5 (0.1)	1.8 (0)	6.7 (0.2)	2.4 (0)	38.7 (0.6)	7.4 (0.1)	123.9 (0.9)
<i>Scheduler Saturation (%)</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Resource Saturation (%)</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.1 (0)	31 (0.5)	6.2 (0.1)	1052.1 (7.8)	806.6 (6)
Total de Usuarios	2662.1	2662.1	4021.3	4021.3	6678.9	6678.9	13484.4	13484.4

Tabla V.10: Distribución de usuarios en promedio según el estado de conexión para ICIC y FFR1, empleando distintas densidades de usuario (x2, x3, x5, x10)

En principio al observar la tabla anterior se puede afirmar que los resultados para el caso x2 de ambas estrategia son sumamente similares, y que las leves diferencias que existen se deben al número de usuarios no conectados por un estado *No Service*, cuyo significado se explicó anteriormente. A medida que se fue incrementado el número de usuarios de la red, como en el caso x3, se incrementó también el número de usuarios rechazados debido al mismo estado de *No Service*; este hecho se ve reflejado en mayor medida para FFR1. En la comparación del caso x5 se hizo más evidente las diferencias entre las dos estrategias, a pesar de que ICIC presentara una cantidad ligeramente superior de usuarios conectados y mantuviera la tendencia a poseer menos usuarios con estado de *No Service* con respecto a FFR1, apareció por primera

vez un conjunto de usuarios rechazados por falta de recursos (*Resource Saturation*). Sin embargo, al observar los porcentajes tanto de usuarios conectados como no conectados, se puede decir que las dos estrategias aun se siguen comportando a gran escala de forma muy similar. No obstante, al estudiar el caso x10, se observó como esta vez la estrategia FFR1 presentaba un porcentaje de usuarios conectados superior al alcanzado por ICIC y cuya diferencia se debía a que los recursos reservados para los usuarios de borde de celda fueron insuficientes para satisfacer la demanda, generando un aumento importante de la cantidad de usuarios rechazados por *Resource Saturation*.

Por lo tanto, para la red planteada, incrementar la densidad de usuarios logra aumentar los niveles de interferencias hasta llegar a un punto en donde algunos usuarios no consiguen conectarse debido a que presentan un nivel de $C/(I+N)$ inferior al necesario, situación que ocurre para cualquiera de los enlaces pero principalmente en el *downlink* dado que presenta un mayor tráfico. Sin embargo, al seguir aumentando la densidad en vez de generar un incremento importante de la interferencia, más bien genera un incremento considerable del tráfico, sobrecargando la red y haciendo que una gran cantidad de usuarios no puedan conectarse debido a la falta de recursos.

En vista de los resultados obtenidos desde los puntos V.1 hasta el actual, se puede resumir que la estrategia FFR3 es la que hace un uso más eficiente de cada recurso utilizado por celda, ya que logra niveles de $C/(I+N)$ elevados que permiten acceder a los esquemas de modulación/codificación (radio *bearer*) de más alta eficiencia espectral. Sin embargo, para lograr esto cada celda ha de sacrificar la cantidad de recursos que dispone, limitándose únicamente una fracción de la banda más pequeña en comparación a las otras dos estrategias, lo cual conlleva a una disminución de la capacidad de tráfico soportable en cada celda, y cuyo impacto se refleja en un usuario el cual, a pesar de presentar condiciones radio ideales, tendrá un *throughput* máximo alcanzable inferior. Por otra parte, con respecto a FFR1 e ICIC, se tiene que para el segundo logra $C/(I+N)$ mayores en toda la red, y que el *throughput* máximo

alcanzable es el mismo que para FFR1, pero únicamente para aquellos usuarios que estén en el centro de la celda, ya que pueden acceder al mismo número de recursos que los de FFR1, en cambio aquellos usuarios en el borde solo pueden acceder a la fracción de la banda que la celda servidora tenga configurada para su uso (en este caso a un tercio).

Asimismo cabe destacar que el rendimiento de cada estrategia depende en gran medida de las condiciones del entorno y la configuración de la red, ya que si una red está muy cargada puede que en FFR1 los usuarios que se encuentren en el borde de la celda no alcancen la $C/(I+N)$ necesaria para conectarse a la red, a diferencia de ICIC que es más robusto frente a este hecho, soportando más usuarios con velocidades aceptables. Además si algún enlace presenta bajos niveles de interferencia, ya sea por una baja densidad de usuarios o porque exista una baja demanda de recursos para los tipos de servicios configurados, el ejecutar una estrategia de gestión de interferencias (ICIC) o de reuso frecuencial mayor a 1 (FFR3) no genera ningún beneficio, más bien perjudica el funcionamiento de toda la red. Adicionalmente un beneficio que ofrece la estrategia ICIC es la independencia de enlace, al poder ser aplicado en cualquiera de los dos enlaces o en ambos y que los resultados de cada enlace sean independientes. Por lo tanto, puede resultar beneficioso aplicar ICIC en el enlace que así lo requiera sin necesidad de aplicarlo en aquel que no, a diferencia de FFR3 que cuando se utiliza limita a ambos enlaces por igual.

V.5 MODIFICACIÓN DE RB MÍNIMOS REQUERIDOS POR SERVICIO.

Dado que en el punto anterior no se logró explotar los beneficios de ICIC, al agotarse primero los recursos en lugar de incrementarse la interferencia, se decidió crear un nuevo escenario, en el que los usuarios se vieran obligados a pasar de un cierto nivel de portadora a ruido más interferencia para poder ser capaz de conectarse a la red y acceder a los servicios solicitados. Para ello se modificaron los radio *bearers* mínimos necesarios para cada servicio, asignando para todos el número 6 en lugar del

número 1 establecido por defecto. Una tabla con la relación entre el número de RB y valor de nivel de señal portadora a ruido más interferencia se puede observar en la Figura V.21 aplicada para ambos enlaces.

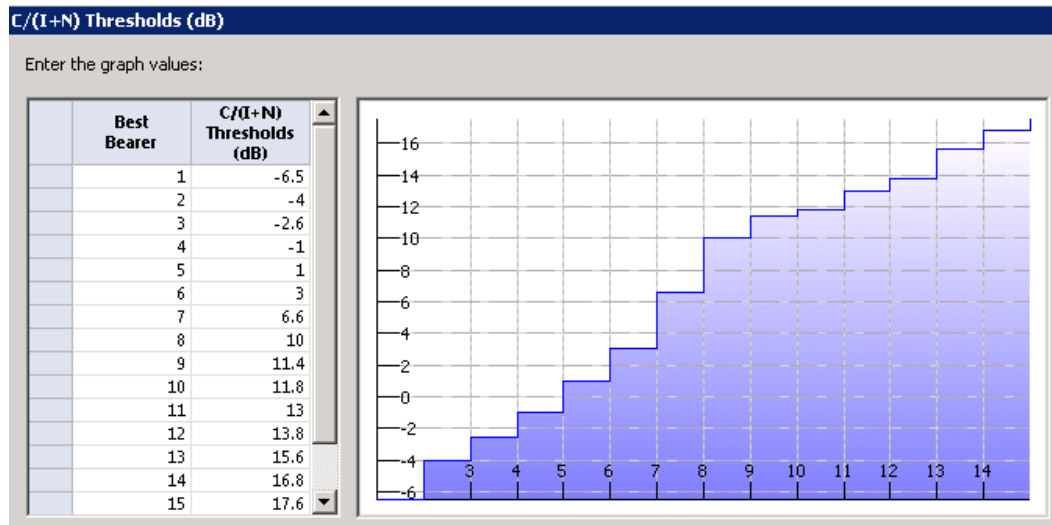


Figura V.21: Relación entre el número de RB y nivel de C/(I+N)
Fuente: Elaboración Propia

Posterior a esta modificación se realizaron un total de 7 grupos de 10 simulaciones para los casos ICIC, ICIC DL² y FFR1, utilizando las siguientes densidades de tráfico: desde x1 a x4, x6, x8 y x10. Una vez realizadas las simulaciones se procedió a generar el gráfico mostrado en la Figura V.22, donde se indica el porcentaje de usuarios no conectados para cada caso (líneas) y también el porcentaje de usuarios rechazados por el estado *No Service* (barras), es importante destacar que en cada una de las simulaciones realizadas, esta fue la única causa de rechazo que se generó, el resto de usuarios no conectados se debían al estado *Inactive*.

² Donde sólo se habilita la opción de ICIC para el *downlink*.

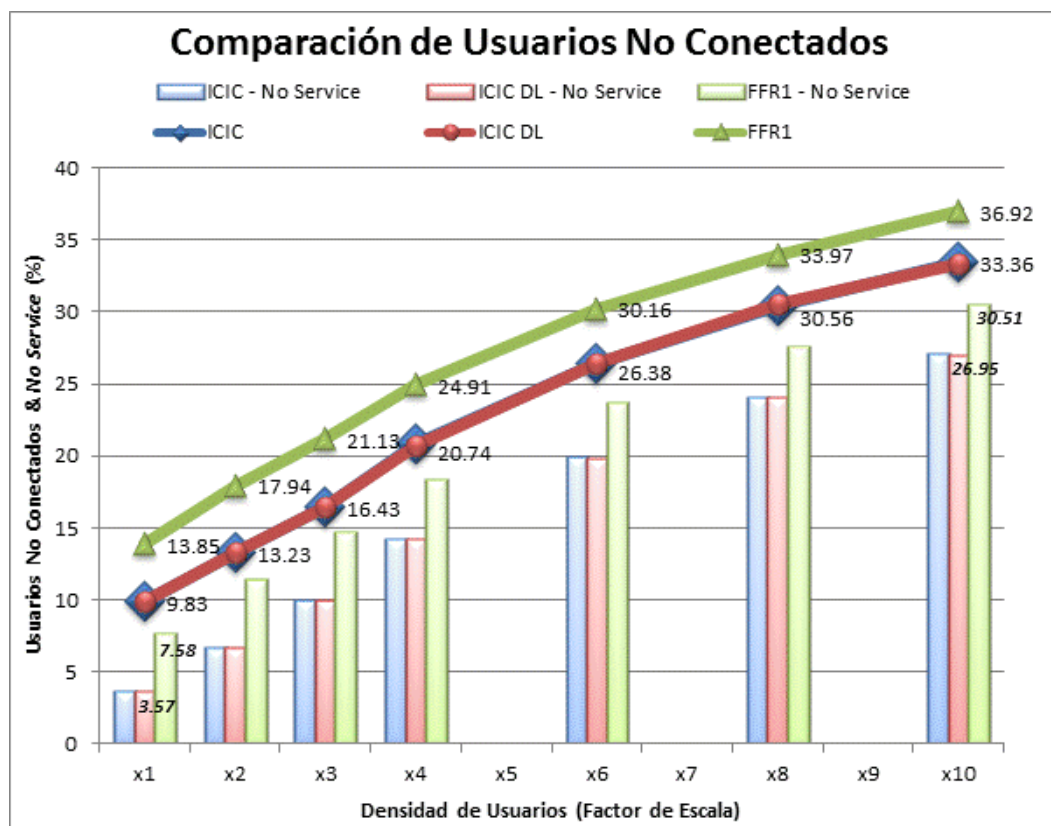


Figura V.22: Comparación de Usuarios No conectados según densidad de usuarios. (ICIC, ICIC DL y FFR1)

Fuente: Elaboración Propia

Observando los resultados de la Figura V.22, se puede afirmar que aplicar la estrategia ICIC en ambos enlaces o solo en el descendente produce resultados prácticamente iguales, aunque este último es siempre un poco inferior al primero, por lo tanto el aporte que ofrece aplicar ICIC UL para este escenario es mínimo. Asimismo se observa que para todos los casos, FFR1 obtiene un porcentaje superior al 3.5% de usuarios no conectados, en comparación a ICIC DL, generándose la máxima diferencia para el caso x2 y x3 con un valor de 4.71%.

Asimismo para el estado *No Service* en el caso x1 se aprecia una diferencia de un poco más el doble de usuarios que presentan dicho estado para FFR1 con respecto al porcentaje obtenido para ICIC DL. Dicha diferencia se va reduciendo paulatinamente hasta llegar a tener una diferencia mínima de aproximadamente el 3.5%.

De esta manera se refleja los beneficios que pueden existir al utilizar ICIC en caso de que los requerimientos de $C/(I+N)$ para emplear los esquemas de modulación codificación (radio *bearer*) de mayor eficiencia espectral sean más altos que los especificados por defecto en Atoll, o que algunos servicios exijan un mínimo valor de RB para funcionar apropiadamente.

V.6 IMPACTO DE UTILIZAR SERVICIOS SIMÉTRICOS SOBRE EL UPLINK

Como se, ha observado a lo largo de los puntos anteriores, el *uplink* es el enlace que menos variaciones de comportamiento presenta. En líneas generales se puede pensar que esta invariabilidad es ocasionada debido a la asimetría que poseen tanto los servicios soportados por la red como la configuración de los perfiles de usuario (*Standard* y *Business*) que Atoll trae por defecto. Por lo tanto para desarrollar este punto, se modificaron los servicios y los perfiles de usuario originales, cuya configuración se muestran en las Figura V.23 y Figura V.24 respectivamente, de forma que se establecieran los mismos valores para ambos enlaces.

En las dichas Figuras se muestra que la asimetría inicial en los servicios se debe al *FTP Download* y *Web Browsing*, y que la cantidad de información requerida por ambos tipos de usuario en dichos servicios es mucho mayor en el *downlink*. De la misma forma, y apoyado de los resultados del punto anterior, se decidió seguir utilizando el radio *bearer* número 6 como mínimo RB para acceder a todos los servicios y se modificó en la tabla de celdas el valor máximo de *Uplink Noise Rise* a 10dB (antes estaba en 6dB por defecto) con el fin de buscar un incremento de la interferencia.

Name: FTP Download			
Uplink		Downlink	
Activity factor:	1	1	
Average requested throughput:	32 kbps	256 kbps	
Type: Data			
Priority:	0	(0:lowest)	
Uplink		Downlink	
Highest bearer:	15	15	
Lowest bearer:	1	1	
Max throughput demand:	128 kbps	1,024 kbps	
Min throughput demand:	16 kbps	64 kbps	
Application throughput			
Scaling factor:	95 %	Offset:	0 kbps
Body loss:	0 dB		

Name: Video Conferencing			
Uplink		Downlink	
Activity factor:	0.5	0.5	
Average requested throughput:	64 kbps	64 kbps	
Type: Voice			
Priority:	2	(0:lowest)	
Uplink		Downlink	
Highest bearer:	15	15	
Lowest bearer:	1	1	
Max throughput demand:	64 kbps	64 kbps	
Min throughput demand:	64 kbps	64 kbps	
Application throughput			
Scaling factor:	95 %	Offset:	0 kbps
Body loss:	0 dB		

(a)

Name:

	Uplink	Downlink
Activity factor:	0.6	0.6
Average requested throughput:	12.2 kbps	12.2 kbps

Type:

Priority: (0:lowest)

	Uplink	Downlink
Highest bearer:	15	15
Lowest bearer:	1	1
Max throughput demand:	12.2 kbps	12.2 kbps
Min throughput demand:	12.2 kbps	12.2 kbps

Application throughput

Scaling factor: Offset:

Body loss:

Name:

	Uplink	Downlink
Activity factor:	1	1
Average requested throughput:	32 kbps	64 kbps

Type:

Priority: (0:lowest)

	Uplink	Downlink
Highest bearer:	15	15
Lowest bearer:	1	1
Max throughput demand:	64 kbps	128 kbps
Min throughput demand:	32 kbps	64 kbps

Application throughput

Scaling factor: Offset:

Body loss:

(b)

Figura V.23: Configuración Inicial de los Servicios: (a) FTP Download, Video Conf.; (b) VoIP, Web Browsing.

Fuente: Elaboración Propia

Name:

Service use:

	Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
	FTP Download	MIMO Terminal	0.01		2,000	15,000
	Video Conferencing	MIMO Terminal	0.01	600		
	VoIP	Mobile Terminal	0.2	240		
	Web Browsing	MIMO Terminal	0.1		700	4,500

Name:

Service use:

	Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
	Web Browsing	MIMO Terminal	0.1		700	4,500
	VoIP	Mobile Terminal	0.2	240		

Figura V.24: Configuración Inicial de los Perfiles de Usuario.
Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se crearon dos grupos de 10 simulaciones para el caso FFR1 e ICIC UL con un factor de escala igual a 3, y por último se realizaron las predicciones 61 y 62 para comparar la relación portadora a ruido más interferencia que se produce en ambos casos, y los estudios 63 y 64 con el fin de observar las diferencias de ruido total (I+N) del enlace. La configuración de los cuatro estudios se indica en la Tabla V.11 y basan su carga de tráfico en los grupos de simulaciones creados previamente. Los resultados se presentan en las Figura V.25 y Figura V.26

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
61	Coverage by C/(I+N) Level (UL)	ICIC UL x3	PUSCH C/(I+N) Level (UL) Value Intervals: 30:-1:-20
62		FFR1 x3	
63	Coverage by C/(I+N) Level (UL)	ICIC UL x3	PUSCH Total Noise (I+N) (UL) (dBm) Value Intervals: 30:-1:-20
64		FFR1 x3	

Para los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal *MIMO*, movilidad *Pedestrian*, servicio *Web Browsing* y *Shadowing* de 80%.

Tabla V.11: Estudios de C/(I+N) e (I+N) utilizando ICIC UL y FFR1 (x3)
Fuente: Elaboración Propia

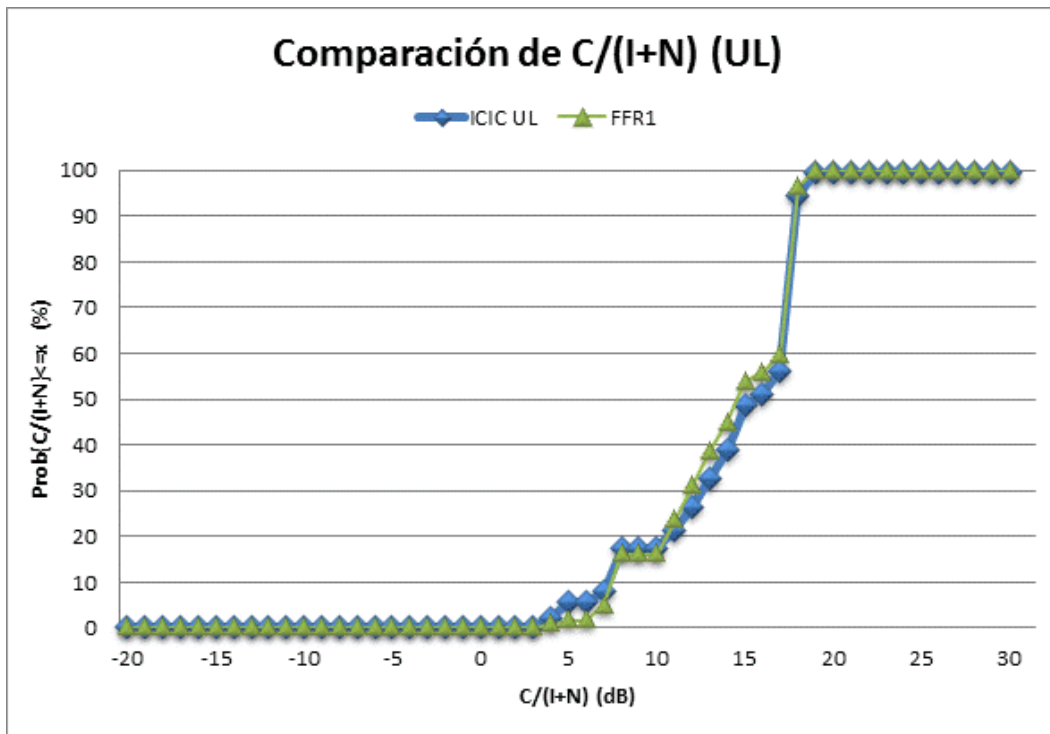


Figura V.25: Comparación del PUSCH $C/(I+N)$ en ICIC UL y FFR1(x3)
Fuente: Elaboración Propia

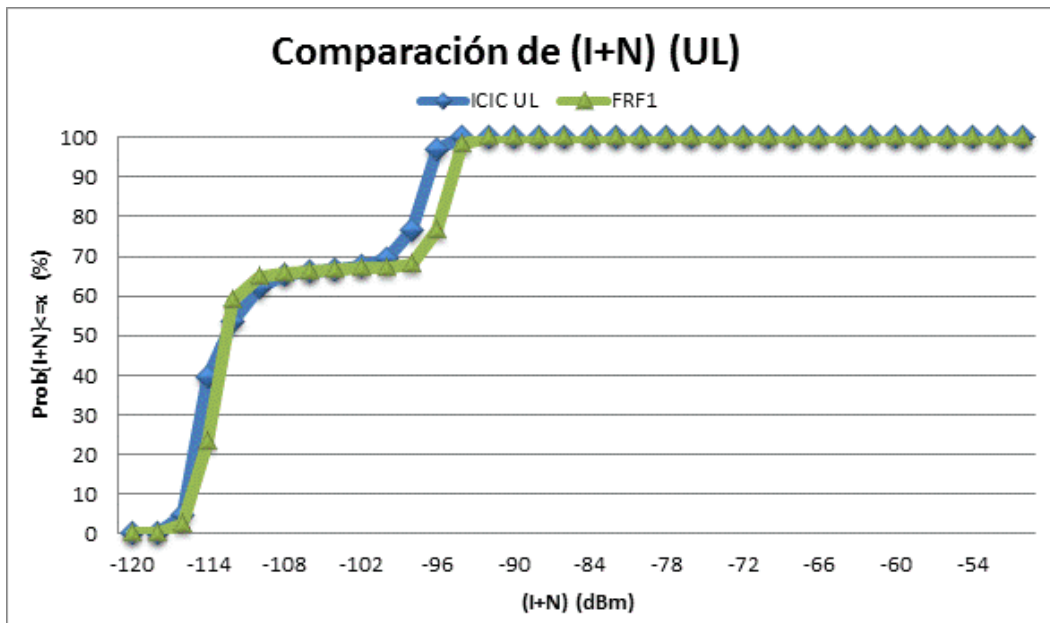


Figura V.26: Comparación del PUSCH $(I+N)$ en ICIC UL y FFR1(x3)
Fuente: Elaboración Propia

V.6.1 PUSCH C/(I+N) (UPLINK)

En los resultados de PUSCH C/(I+N) de la Figura V.25 se observa que a pesar de todos los cambios realizados el comportamiento de las curvas sigue siendo muy similar entre sí. Sin embargo, existe una pequeña diferencia para los valores entre 11 y 17dB en la que ICIC UL es relativamente mejor que FFR1, dado que se obtienen porcentajes superiores de terreno con niveles inferiores de (I+N).

V.6.2 PUSCH (I+N) (UPLINK)

Con respecto a los resultados de PUSCH (I+N) de la Figura V.26 se observa que se logró reducir el valor ruido más interferencia, aunque levemente, lo cual representa un resultado contradictorio con respecto al obtenido de C/(I+N) del punto anterior, donde las curvas eran sumamente similares. Por este motivo se procedió a utilizar los resultados directos proporcionados por el grupo de simulaciones ICIC UL (x3) y FFR1 (x3), para calcular el valor de potencia recibida PUSCH (C); la razón por la que se utilizaron los resultados de las simulaciones y no se crearon nuevas predicciones, es que esta última sólo permite calcular el valor de potencia máxima y no el valor de potencia recibida real utilizado para los cálculos de interferencia.

A partir de la información obtenida de la pestaña *Mobile* de la simulación 0, tanto de ICIC UL (x3) como de FFR1(x3), se crearon las curvas de PUSCH C, se generaron las curvas de la Figura V.27 correspondientes con la función distribución acumulativa del valor de potencia recibido por la celda según el total de usuarios de la red.

De la Figura V.27 se puede interpretar que existe un mayor porcentaje de usuarios que transmiten a una potencia inferior y por lo tanto el valor de potencia recibida por las celdas servidoras de dichos usuarios es también menor. Por ejemplo, para FFR1 la potencia PUSCH recibida proveniente de un 81% de usuarios es inferior a -80dBm, en cambio para ICIC UL esto sucede para un 87,8% de los usuarios. Por lo tanto, la razón por la que la PUSCH C/(I+N) del enlace ascendente sea prácticamente invariable, es que en ella se realiza un procedimiento de control de potencia, de forma

que los usuarios se adaptan a las condiciones radio del entorno y transmiten a mayor o menor potencia según sea necesario.

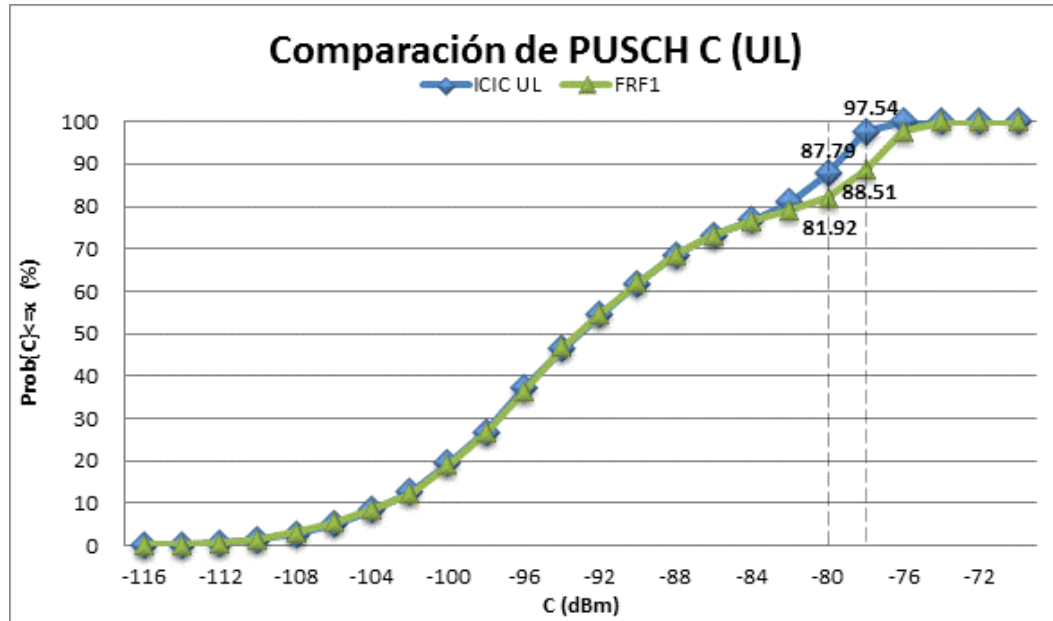


Figura V.27: Comparación del PUSCH C en ICIC UL y FRF1(x3)

Fuente: Elaboración Propia

V.7 TÉCNICAS MIMO CON Y SIN ICIC.

Como último punto de estudio, se decidió observar el impacto a nivel de *throughput* que se genera al utilizar (1) técnicas de diversidad de transmisión y recepción, (2) técnicas de multiplexación espacial (*Single User MIMO* - SU-MIMO) y (3) técnicas AMS¹ (*Adaptive MIMO Switching*), en combinación con la estrategia de gestión de interferencias ICIC, variando el número de antenas de transmisión y recepción.

En primer lugar se restablecieron los valores de perfiles de usuario modificados en el punto anterior y las velocidades mínimas y máximas de los servicios a su estado original como se muestra en la Figura V.23 y Figura V.24. Para este punto se utilizó el grupo de simulaciones ICIC creado inicialmente en V.1, el cual incluía soporte

¹ AMS combina la técnica de multiplexación espacial con la técnica de diversidad de transmisión, y la selección de cada uno depende de un umbral de C/N o C/(I+N) definido.

ICIC en ambos enlaces y un umbral de *Delta Path Loss* igual a 3dB, dichas simulaciones sirvieron de base comparativa para el resto de pruebas a realizar.

Para (1) el primer paso fue modificar a 2 el número de antenas tanto de recepción como de transmisión de cada celda (2x2), habilitando la opción de diversidad en la tabla de celdas. Seguidamente se creó un grupo de 10 simulaciones con o sin incluir la estrategia ICIC. Después se repitieron los mismo pasos, pero utilizando 4 antenas de transmisión y recepción (4x4).

Asimismo, para (2) y (3), se realizó un procedimiento similar, la única diferencia estuvo en el tipo de técnica a seleccionar, escogiendo SU-MIMO y AMS respectivamente. Además para AMS se estableció un umbral de selección de $C/(I+N)^2$ igual a 0dB, según el cual se elige entre utilizar la técnica de diversidad o la técnica de multiplexación especial. Para cada uno de los planteamientos se crearon sus respectivos grupos de 10 simulaciones con y sin ICIC, seguidamente se repitieron estos pasos pero para 4 antenas de transmisión y recepción (4x4).

Una vez creados los grupos de simulaciones se realizaron las predicciones de *throughput* con las diferentes cargas de tráfico como se muestra en la Tabla V.12. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura V.28 y Figura V.29.

Es importante destacar que colocar un terminal de tipo MIMO en las configuraciones de las predicciones afecta el resultado final, ya que cuando Atoll realiza los cálculos toma en consideración la cantidad de antenas (por defecto 2x2) que el terminal posee para utilizar las técnicas de diversidad.

² El umbral puede ser configurado según la C/N o la $C/(I+N)$, para modificarlo, es necesario acceder a las opciones de la carpeta *Network* de Atoll.

ID	Tipo de Estudio	Carga	Display	ID	Tipo de Estudio	Carga	Display
65	Coverage by Throughput (DL)	Div 2x2	Effective RLC Channel Throughput (DL) Value Intervals: 60000:-500:0	77	Coverage by Throughput (UL)	Div 2x2	Effective RLC Channel Throughput (UL) Value Intervals: 60000:-500:0
66		Div 4x4		78		Div 4x4	
67		Div 2x2+ICIC		79		Div 2x2+ICIC	
68		Div 4x4+ICIC		80		Div 4x4+ICIC	
69		SU-MIMO 2x2		81		SU-MIMO 2x2	
70		SU-MIMO 4x4		82		SU-MIMO 4x4	
71		SU-MIMO 2x2+ICIC		83		SU-MIMO 2x2+ICIC	
72		SU-MIMO 4x4+ICIC		84		SU-MIMO 4x4+ICIC	
73		AMS 2x2		85		AMS 2x2	
74		AMS 4x4		86		AMS 4x4	
75		AMS 2x2+ICIC		87		AMS 2x2+ICIC	
76		AMS 4x4+ICIC		88		AMS 4x4+ICIC	
Para los estudios de esta tabla se configuró en la sección de Condiciones: un terminal <i>MIMO</i> , movilidad <i>Pedestrian</i> , servicio <i>Web Browsing</i> y <i>Shadowing</i> de 80%.							

Tabla V.12: Estudios de *throughput* utilizando técnicas de diversidad MIMO combinadas con ICIC.

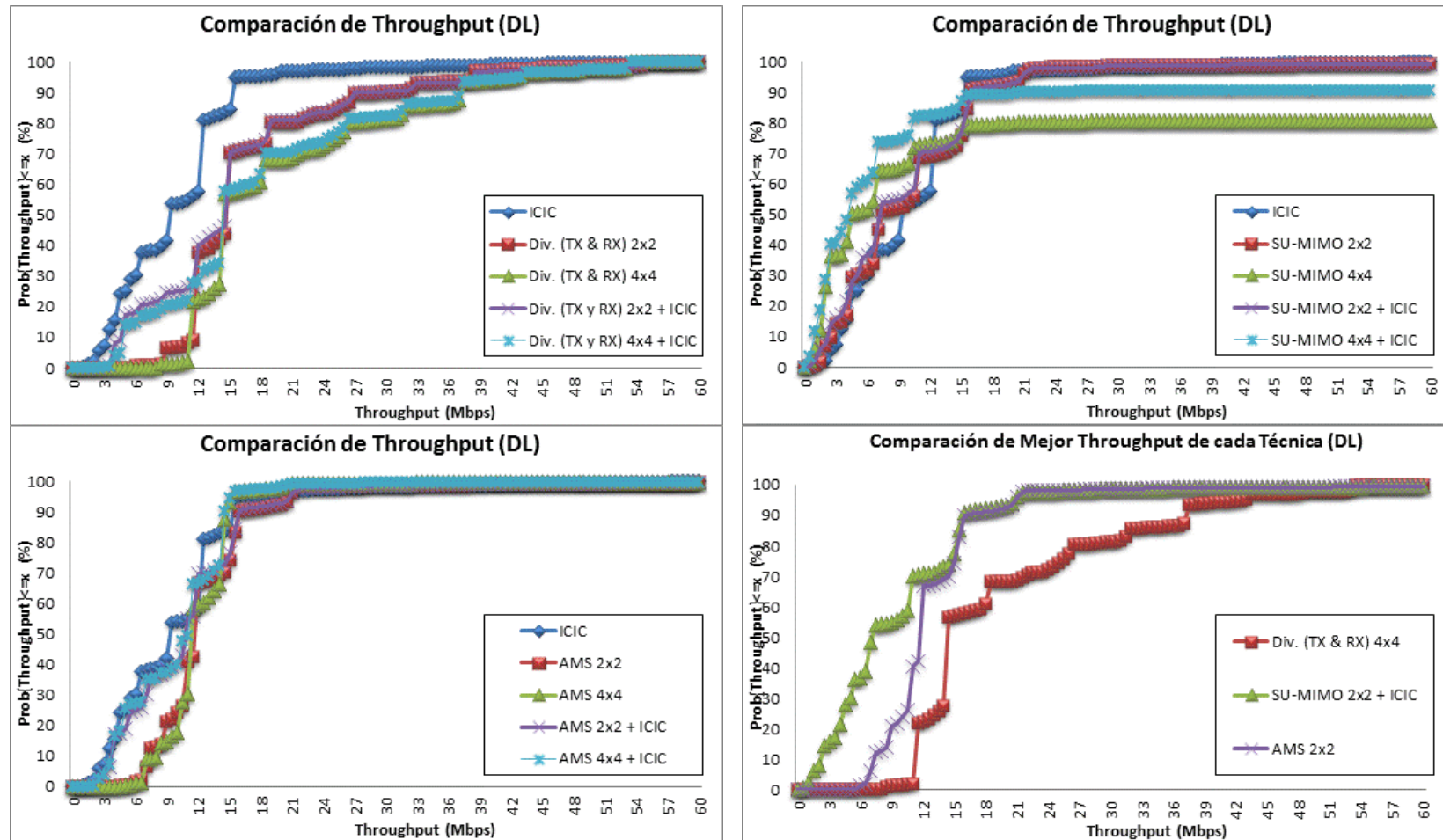


Figura V.28: Comparación del *Effective RLC Channel throughput downlink* para las técnicas de diversidad MIMO.

Fuente: Elaboración Propia

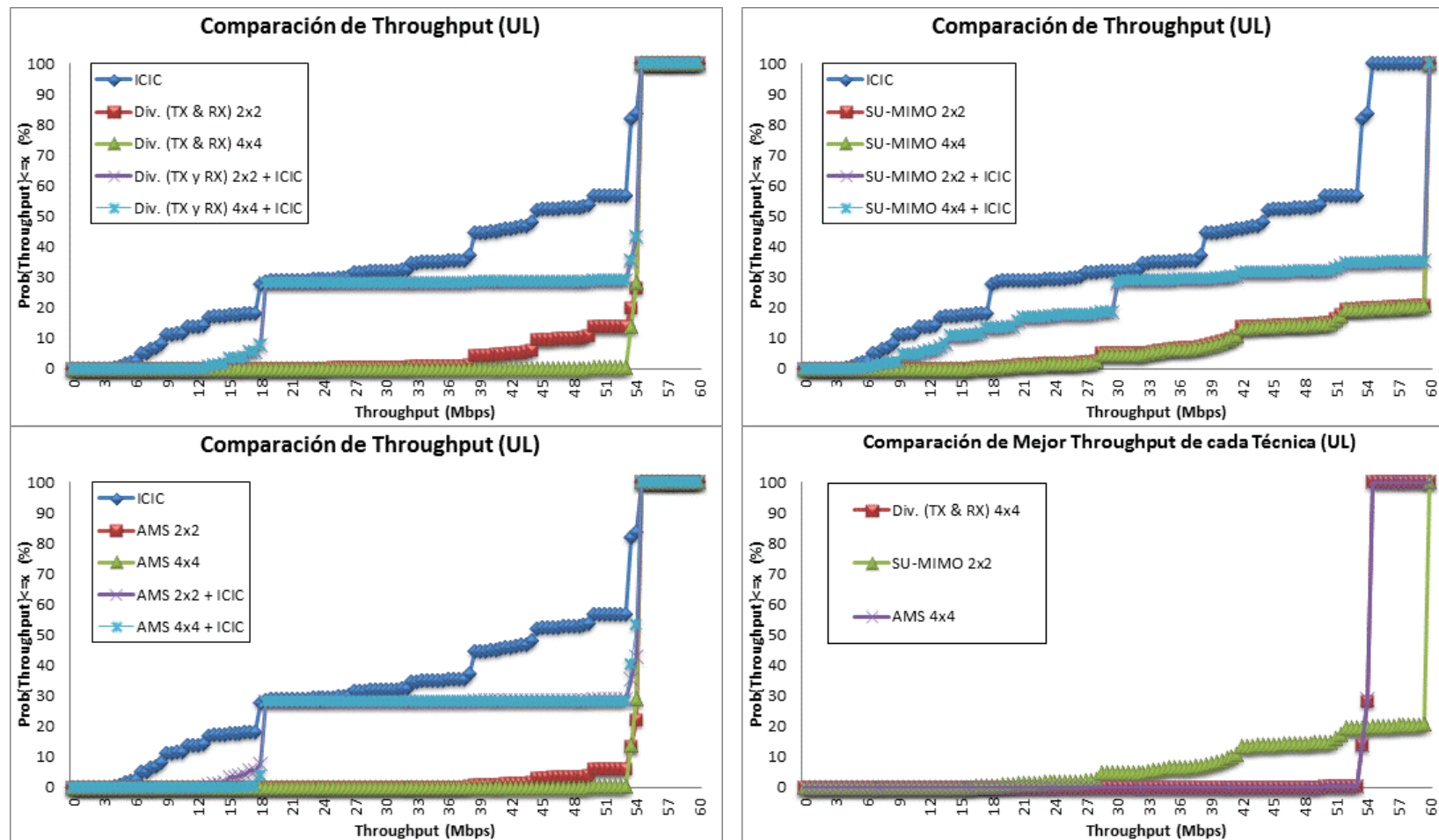


Figura V.29: Comparación de Effective RLC Channel throughput uplink para las técnicas de diversidad MIMO

Fuente: Elaboración Propia

V.7.1 EFFECTIVE RLC CHANNEL THROUGHPUT DOWNLINK CON TÉCNICAS MIMO.

Observando los resultados para las diferentes técnicas MIMO en el *downlink* se observa que las técnicas de diversidad de transmisión y recepción son las que mayor mejoras al *throughput* ofrecen, esto se debe a que dicha técnica mejora el nivel de portadora a ruido en toda la zona de estudio, permitiendo a un porcentaje mayor de usuarios el acceso a radio *bearers* de mayor eficiencia espectral. Asimismo se aprecia, para este mismo caso, que al combinarse con la estrategia ICIC, aumenta el porcentaje de territorio que presenta valores de *throughput* más bajos hasta los 15Mbps correspondiente con los usuarios ubicados al borde de celda que solo tienen un tercio de los recursos, perjudicando a la técnica de diversidad haciendo innecesario que se combinen, dado que el aporte que ofrece la técnica MIMO es suficiente como para mejorar el *throughput*.

Por otro lado la técnica SU-MIMO es la que peores resultados ofrece, siendo las velocidades alcanzadas en su mayoría inferiores a las obtenidas al implementar únicamente ICIC. Inclusive se puede observar como SU-MIMO 4x4 llega a cubrir apenas un 80% de la zona de estudio, y que este porcentaje mejora al combinarse con ICIC, cubriendo a casi un 90% del territorio. La razón de esta desmejora se atribuye a que esta técnica, a pesar de estar orientada a mejorar los valores de *throughputs*, necesita ser aplicada bajo unas condiciones de canal suficientemente buenas.

Asimismo para AMS se observa que las variantes AMS 2x2 y AMS 4x4 alcanzan velocidades superiores para un mismo porcentaje de territorio en comparación al caso ICIC. Sin embargo, al combinar esta técnica con ICIC se aprecia que lo único que ocasiona es aumentar el porcentaje de territorio que alcanza las velocidades más bajas

V.7.2 EFFECTIVE RLC CHANNEL THROUGHPUT UPLINK CON TÉCNICAS MIMO.

En la Figura V.29 se observan los resultados para el *uplink*. En ellos se puede notar que en todos los casos la estrategia ICIC es la que presenta las velocidades más bajas para todo el territorio. Igualmente las combinaciones de las técnicas MIMO utilizadas con ICIC limitan las velocidades de casi un 30% de la zona de estudio, la cual no puede superar los 18Mbps para los casos de diversidad y AMS, debido a que esta zona corresponde con el porcentaje del área considerada como borde de celda, la cual es atendida utilizando nada más un tercio de los recursos totales del canal. Lo mismo ocurre para SU-MIMO, pero en este caso se logra alcanzar valores superiores de hasta 30Mbps para el mismo porcentaje de terreno.

Dado que el canal en el *uplink* presenta condiciones muy favorables, la técnica de multiplexación espacial (SU-MIMO) logra explotar su funcionalidad de transmitir distintos flujos de información por las antenas al máximo, obteniendo velocidades que superan inclusive los 60Mbps. A diferencia de las otras dos técnicas cuyo tope está limitado a 55Mbps aproximadamente

CAPÍTULO VI.

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Las estrategias de gestión del espectro radioeléctrico son una forma de hacer frente ante aquellas características y factores de una red que no son controlables por los encargados de la planificación, puesta en marcha y control posterior de la misma, como por ejemplo la distribución dinámica de los usuarios, la forma del terreno sobre la cual se establece la red, etc. A pesar de ello en la actualidad existen una serie de herramientas, como Atoll, con las que se puede lograr un modelado de las condiciones del entorno, de forma tal que se pueda estudiar el efecto que se produce al adoptar y combinar los distintos tipos de estrategias.

Particularmente en este proyecto, se evaluaron y analizaron aquellas ventajas y/o desventajas que ofrecen las estrategias de gestión del espectro radioeléctrico aplicadas a LTE. En concreto se estudiaron 3: FFR1, basada en un esquema de reuso de frecuencia, donde todos los recursos están disponibles para todas las celdas; FFR3, al igual que el anterior está basada en el reuso de frecuencia, pero los recursos están divididos en 3 grupos y cada grupo es asignado a una celda dentro de un grupo de 3 celdas; e ICIC que es una estrategia de coordinación de interferencias. Dicho análisis se realizó para cada uno de los enlaces, simulando una serie de escenarios y situaciones sobre una red previamente planificada.

En primer lugar se concluyó que es sumamente importante evaluar el estado inicial del enlace con respecto a la relación portadora a ruido C/N , para luego poder comparar el comportamiento de la red bajo ciertas condiciones de carga, y de esta forma poder determinar si el enlace se encuentra limitado por la presencia de interferencias o no, dado que esto influye directamente sobre la efectividad de aplicar una estrategia de gestión del espectro radioeléctrico.

A través de los resultados obtenidos de forma general se pudo concluir que la estrategia FFR3 es la que hace un uso más eficiente de cada uno de los recursos que

utilizan sus celdas, ya que consigue alcanzar niveles de $C/(I+N)$ suficientemente elevados como para acceder a los radio *bearer* de más alta eficiencia espectral. Sin embargo, para lograr esto es necesario que se limite la cantidad de recursos utilizados en cada celda, por lo que se fracciona el ancho de banda a utilizar en tres partes iguales y se asigna a cada celda una de las partes con la distribución más eficiente posible (planificación frecuencial). Este hecho es el que produce la mejora de la relación $C/(I+N)$ ya que la concentración de potencia que se genera al utilizar el mismo nivel de potencia de transmisión de la celda en un ancho de banda menor, produce un aumento de la energía por recursos elemental EPRE.

Asimismo, el hecho de que cada celda utilice menos recursos limita el tráfico máximo soportable por celda, siendo FFR3 el peor de los tres casos estudiados, ya que cada una de ellas tendría menos recursos para repartir entre sus usuarios pudiendo verse saturadas con menos tráfico en comparación a las otras estrategias. También impacta directamente en el máximo *throughput* que un usuario es capaz de alcanzar (a pesar de presentar condiciones radio ideales), ya que es posible conseguir *throughput* mayores con muchos recursos que utilicen RB de eficiencia espectral media que con pocos recursos que usen RB de alta eficiencia espectral. Por lo tanto en este caso se generan los *throughput* más bajos de los tres.

Por otro lado, al comparar la estrategia ICIC con respecto al esquema FFR1, se llegó a la conclusión de que FFR1 logra los peores niveles de $C/(I+N)$ dado que no gestiona las interferencias presentes de ninguna forma, en cambio ICIC, al sí hacerlo, alcanza niveles no tan altos como los de FFR3, pero sí superiores a FFR1. Esta diferencia es una consecuencia de que usuarios cercanos en el borde de celdas adyacentes utilicen bloques de frecuencias distintos, disminuyendo así la interferencia. Sin embargo, este comportamiento se invierte para el *throughput*, ya que FFR1 consigue los mayores *throughput* en un porcentaje de territorio mayor, esto se debe a que aquellas zonas consideradas para la estrategia ICIC como borde de celda presentan un número limitado de recursos para servir.

Otro aspecto que fue comparado es la carga de tráfico percibida por las celdas, para la que FFR1 consigue los menores porcentajes de carga de tráfico en sus celdas en comparación con ICIC, esto se debe a que a pesar de que se utilicen más recursos para atender a la misma cantidad de usuarios que en ICIC, la relación entre recursos requeridos sobre recursos totales sigue siendo inferior para FFR1.

Adicionalmente fueron estudiados los resultados obtenidos en detalle por usuario, de los cuales se pudo concluir que un factor influyente en las interferencias que se generaban es la cantidad de tráfico que se presenta para un enlace u otro, que a su vez está relacionado con los tipos de servicios ofrecidos, así como los tipos de usuario que hacen uso de la red. De la misma forma se pudo reconocer que la información obtenida en detalle por usuario corresponde en comportamiento con los resultados conseguidos previamente de forma general, ya que la cantidad de usuarios rechazados debido a un nivel insuficiente de $C/(I+N)$ (Estado de *No Service*) es superior en FFR1 que en FFR3, con análoga relación al hecho de que en FFR1 se tenía un peor nivel de $C/(I+N)$ que en FFR3, es decir que los estudios en detalle por usuario sirven para tener otro enfoque acerca del comportamiento de las estrategias sobre un mismo escenario. Por otra parte se pudo verificar que a pesar de que los *throughput* máximos de canal y el comportamiento de las curvas de *throughput* sobre el terreno de cada estrategia eran distintos, al observar los resultados para cada usuario se pudo determinar que para las condiciones básicas configuradas de la red estudiada (es decir, sin incrementar la densidad de usuarios) las tres estrategias satisfacían las demandas de los usuarios simulados sobre la zona de estudio, y que las diferencias existentes se debían a aquellos usuarios considerados *No Service*.

A través de la evaluación del comportamiento de $C/(I+N)$ con escenarios en donde sólo estuviese configurado la estrategia ICIC para el enlace ascendente, el descendente o en ambos, se pudo determinar que el funcionamiento de dicha estrategia en un enlace es independiente de la configuración que existiese en el otro en cuestión de si tiene habilitada o no la estrategia ICIC.

Comparando la estrategia ICIC y FFR1 sobre su comportamiento a medida que se iba aumentando la densidad de usuarios presentes en la red, se pudo concluir que ICIC presenta una mayor robustez frente a los efectos causados por el incremento del número de usuarios, manteniendo la cobertura en casi todo el territorio a cambio de una disminución del *throughput* máximo en las zonas del terreno, a diferencia de FFR1 el cual mantiene el *throughput* para un porcentaje bajo del terreno, pero no logra alcanzar a cubrir el mismo porcentaje que lo hace la estrategia ICIC. Sin embargo, también se pudo concluir, a través de la evaluación de los resultados en detalle por usuario de red, que aunque ICIC asegure una mayor cobertura que FFR1, llega un punto en que debido al gran número de usuarios existentes tratando de conectarse, el número de recursos disponibles para los usuarios en el borde de celda no son suficientes para satisfacer la demanda de servicio, ocasionando el rechazo de la conexión por falta de recursos; en cuyo caso FFR1 consigue establecer un número mayor de conexiones.

Por otra parte se determinó que aplicar ICIC en zonas, que a pesar de que tengan altas densidades de usuarios igual presenten pocas interferencias, lo único que logra es perjudicar el rendimiento de la red, reflejándose en una disminución del *throughput* máximo alcanzable por territorio.

Otro escenario planteado permitió reconocer que en caso de que las exigencias de la red, en términos de mínimo RB necesario para poder utilizar algún servicio, fuesen más altas a las configuradas en escenarios anteriores, no se generarían usuarios rechazados por falta de recursos sino que la única razón de rechazo sería por un nivel de $C/(I+N)$ insuficiente (*No Service*); por lo que bajo estas condiciones es la estrategia ICIC la que consigue establecer un número mayor de conexiones.

Adicionalmente se pudo determinar para el enlace ascendente, que aunque los resultados sean sumamente parecidos para un estudio de $C/(I+N)$ utilizando FFR1 o ICIC, no significa que el uso de la estrategia ICIC sea indiferente, sino que en este enlace como se realiza un procedimiento de control de potencia, los usuarios se

adaptan a las condiciones radio del entorno y transmiten a mayor o menor potencia según sea necesario.

Por último al realizarse estudios sobre el impacto que generan las técnicas MIMO al aplicarse con o sin ICIC, se pudo determinar que si el enlace está limitado por interferencias, la técnica MIMO idónea es la de diversidad ya que está orientada a ofrecer mejoras del nivel de portadora a ruido, logrando así el acceso a radio *bearer* de mayor eficiencia espectral y por ende un mayor *throughput* máximo. Sin embargo, al combinarse con la estrategia ICIC no se consigue mejora alguna, más bien se aumentan los porcentajes de territorio que alcanzan las velocidades más bajas, lo que significa que el aporte que ofrece la técnica es suficiente para mejorar la señal percibida por los usuarios permitiendo alcanzar *throughputs* mayores. Sin embargo si el enlace se encuentra limitado por ruido, la técnica que mejores resultados ofrece es la SU-MIMO, dado que las condiciones favorables del entorno le permiten explotar su funcionalidad transmitiendo distintos flujos de datos por las diferentes antenas obteniendo altas velocidades de *throughput*. No obstante, al combinarse con ICIC, no se genera ningún tipo de beneficio ya que al no presentarse interferencias, el enlace no necesita utilizar una estrategias para gestionarlas.

Finalmente, con respecto a las líneas futuras que se puedan tomar a partir de este proyecto se puede mencionar:

Realizar estudios que combinen simultáneamente una cantidad mayor de estrategias de gestión del espectro radioeléctrico como, el uso de diferentes tipos de *scheduler*, control de potencia, entre otros, en conjunto con ICIC.

Utilizar algún otro tipo de *software* con el fin de comparar los resultados obtenidos y en caso de ser posible explicar las diferencias encontradas.

Hacer estudios con programas que permitan recrear escenarios en donde sea aplicado una coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) dinámica para poder evaluar

completamente el rendimiento de esta estrategia, o en su defecto, evaluar el comportamiento de otras variantes de tipo estático de ICIC.

Ejecutar las mismas pruebas pero bajo un escenario más realista donde se incluyan una mayor cantidad de servicios y tipos de usuario, así como estudiar aspectos relacionados con la movilidad y tipos de terminales

Estudiar el comportamiento de combinar ICIC con las técnicas MIMO para un número de combinaciones diferentes de antenas transmisoras y receptoras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez y O. Sallent, LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, Fundación Vodafone España, 2010.
- [2] H. Holma y T. Antti, LTE for UMTS - OFDMA and SCFDMA Based Radio Access, John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [3] Grupo de Comunicaciones Radio UPC, «Sistemas 4G».
- [4] L. Song y J. Shen, Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE, 2011.
- [5] Forsk, Atoll, Radio Planning and Optimizartion Software. User Manual Radio, Vlagnac, 2011.
- [6] Forsk, Atoll, Radio Planning and Optimization Software. Technical Reference Guide, Vlagnac, 2011.

APÉNDICE A

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

A continuación se describen una serie de características, abreviaciones y nomenclaturas utilizadas por Atoll en sus fórmulas de predicciones basadas en los niveles de señal, ruido total e interferencia.

TBC (*To Be Considered*): un transmisor se considera TBC si cumple con las siguientes condiciones:

- Debe estar activo.
- Debe satisfacer el criterio de filtrado definido en la carpeta de *Transmitters*.
- Debe tener un área de cálculo.

Todos los cálculos son realizados sobre los transmisores TBC. Una celda se refiere al par transmisor-portadora (TX-C). La celda en estudio durante un cálculo es referida como $TX_i(ic)$.

Todos los algoritmos de cálculo son descritos para dos tipos de celda:

- **Celda de estudio**, representada con el subíndice “i”, está comprendida por el transmisor estudiado TX_i y su portadora ic . Es la celda sobre la cual se enfoca el estudio. Por ejemplo una celda víctima de la interferencia recibida por otras celdas.
- **Otras celdas**, representado con el subíndice “j”, está comprendida por otro transmisor TX_j y su portadora jc . Las otras celdas en la red pueden ser celdas interferentes (*downlink*) o celdas servidores de móviles interferentes (*uplink*).

Todos los algoritmos de cálculo están descritos por dos tipos de receptores:

- M_i : un píxel (predicciones de cobertura), suscriptor (cálculos sobre lista de suscriptores), o móvil (simulaciones de Monte Carlo) cubierto/servido por la celda de estudio $TX_i(ic)$.
- M_j : un móvil (simulaciones de Monte Carlo) cubierto/servido por cualquier otra celda $TX_j(jc)$.

A continuación se muestran las abreviaciones de las características del receptor:

Nombre	Descripción
L^{M_i}	Pérdidas del terminal para el píxel/móvil M_i
G^{M_i}	Ganancia de la antena del terminal para el píxel/móvil M_i
$L_{Ant}^{M_i}$	Atenuación de la antena del terminal (proveniente de los patrones de antena – <i>antenna patterns</i>) calculados para el píxel/móvil M_i
$L_{Body}^{M_i}$	Pérdidas causadas por el cuerpo definidas por el servicio usado por el píxel/móvil M_i

Predicciones de Coberturas C/(I+N) PDSCH

Las siguientes predicciones de cobertura están basada en el nivel de las señales recibidas, el ruido y las interferencias (**en negrita** las utilizadas en el desarrollo del PFC).

- **Coverage by C/(I+N) Level (DL)**
- Service Area Analysis (DL)
- **Coverage by Throughput (DL)**
- Coverage by Quality Indicator (DL)
- **Coverage by C/(I+N) Level (UL)**
- Service Area Analysis (UL)
- **Coverage by Throughput (UL)**
- Coverage by Quality Indicator (UL)

Estas predicciones de cobertura toman en cuenta las características del receptor (L^{M_i} , $L_{Ant}^{M_i}$, G^{M_i} , $L_{Body}^{M_i}$) cuando calculan el parámetro requerido. Para estos cálculos,

Atoll determina el nivel de señal recibida, ruido y la interferencia en cada pixel. Cada pixel dentro del área de cálculo de $TX_i(ic)$ es considerado como un receptor no interferente. Las propiedades de un receptor de prueba no interferente son establecidas a través de la selección de un terminal, un tipo de movilidad y servicio (dentro de las propiedades de la predicción a realizar).

Las predicciones de cobertura en el *downlink* están basadas en las cargas de tráfico *downlink* de las celdas, y las predicciones de coberturas en el *uplink* están basadas en los valores de *uplink noise rise*. Estos parámetros pueden ser calculados por Atoll durante las simulaciones de Montecarlo, o establecidos manualmente por el usuario modificando la tabla de celdas.

APÉNDICE B

CÁLCULO DE PDSCH & PUSCH C/(I+N)

1. Cálculo de PDSCH C/(I+N)

La relación portadora sobre interferencia más ruido es calculada en tres pasos. Primero Atoll calcula el nivel de señal recibida proveniente de la celda de estudio (como se explica más adelante en el punto Cálculo de Nivel de Señal - DL) en un pixel, suscriptor o móvil bajo estudio. Posteriormente, Atoll calcula la interferencia recibida en el mismo pixel, suscriptor o móvil proveniente de todas las celdas interferentes (como se explica después en el punto Cálculo de Interferencia - DL). La interferencia proveniente de cada celda es ponderada conforme el solapamiento co-canal y de canal adyacente que exista entre las celdas de estudio y las interferentes, la carga de tráfico que presenten las celdas interferentes, y un factor de probabilidad de colisión en caso de que se esté utilizando **ICIC** en las celdas. Finalmente, Atoll determina el valor de la relación nivel de la señal con la suma de la interferencia total de otras celdas más el ruido *downlink* (como se indica a continuación en el punto Cálculo de Ruido - DL)

El PDSCH C/(I+N) para la celda $TX_i(ic)$ es calculado como se muestra a continuación para cualquier pixel, suscriptor o móvil M_i

$$CINR_{PDSCH}^{TX_i(ic)} = E_{PDSCH}^{TX_i(ic)} - \left(10 \log \left(\sum_{\text{Todos } TX_j(jc)} \left(10^{\frac{\varepsilon_{PDSCH,PDCCH}^{TX_j(jc)}}{10}} \right) + 10^{\frac{n_{Sym}^{TX_i(ic)}}{10}} \right) + NR_{DL}^{Inter-Tech} \right)$$

Donde,

- $E_{PDSCH}^{TX_i(ic)}$: energía PDSCH por recurso elemental (1 símbolo x 1 subportadora) recibida de la celda $TX_i(ic)$ en el pixel, suscriptor o móvil M_i .

- $\epsilon_{PDSCH, PDCCH}^{TX_j(jc)}$: energía interferente por recurso elemental (dBm/Sym) recibida sobre el PDSCH y PDCCH de cualquier $TX_j(jc)$ en el pixel, suscriptor o móvil M_i cubierto/servido por la celda $TX_i(ic)$.
- $n_{Sym}^{TX_i(ic)}$: ruido *downlink* en una subportadora para la celda $TX_i(ic)$.
- $NR_{DL}^{Inter-Tech}$: *noise rise* de inter-tecnología en el *downlink*. (Valor nulo para los estudios realizados en este proyecto).

Cálculo de Nivel de Señal – DL

Los eNB tienen una potencia de transmisión máxima la cual es compartida entre los canales del enlace descendente, entre ellos el PDSCH. La potencia de transmisión de varios canales es determinada a partir de la distribución de la energía total sobre una trama entre los recursos elementales correspondiente a estos canales. La energía recibida por recurso elemental proveniente de la celda $TX_i(ic)$ en un pixel, suscriptor o móvil M_i se calcula como:

$$E_{PDSCH}^{TX_i(ic)} = EIRP2_{PDSCH}^{TX_i(ic)} - L_{Path} - M_{Shadowing-Model} - L_{indoor} + G^{Mi} - L_{Ant}^{Mi} - L_{Body}^{Mi} + f_{CP}$$

Donde,

- $EIRP2_{PDSCH}^{TX_i(ic)} = EPRE_{PDSCH}^{TX_i(ic)} + G_{Ant}^{TX_i} - L^{TX_i}$
 - $EPRE_{PDSCH}^{TX_i(ic)}$: energía por recurso elemental (EPRE) del canal PDSCH para la celda $TX_i(ic)$.
 - $G_{Ant}^{TX_i}$: ganancia de la antena usada por el transmisor $TX_i(ic)$.
 - L^{TX_i} : pérdidas totales de transmisión para el transmisor $TX_i(ic)$.
- L_{Path} : pérdidas de propagación determinada por la suma de las pérdidas calculadas por el modelo de propagación y la atenuación de la antena del transmisor (patrones de antena).
- $M_{Shadowing-Model}$: margen de *shadowing* basado en la desviación estándar del modelo. En las predicciones de cobertura, se toma en cuenta sólo si la opción se encuentra activada dentro de las propiedades.

- **L_{indoor}** : pérdidas en interiores, tomadas en cuenta cuando la opción de cobertura en interiores se encuentra activa. (Nula para el desarrollo de este proyecto).
- **f_{CP}** : factor de prefijo cíclico. Es la relación entre la energía de símbolo útil y la energía total de símbolo.

La fórmula de energía por recurso elemental involucrada en la fórmula anterior se explica a continuación:

$$EPRE_{PDSCH}^{TX_i(ic)} = EPRE_{DLRS}^{TX_i(ic)} + \Delta EPRE_{PDSCH}^{TX_i(ic)}$$

Donde,

- **$\Delta EPRE_{PDSCH}^{TX_i(ic)}$** : es el *offset* de energía por recurso elemental para el PDSCH con respecto a las EPRE de las señales de referencia. (No se utilizó este parámetro a lo largo de todo el proyecto, es decir, su valor fue igual a cero).
- **$EPRE_{DLRS}^{TX_i(ic)}$** : EPRE de las señales de referencia.

La energía por recurso elemental (EPRE) de las señales de referencia, tiene la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} EPRE_{DLRS}^{TX_i(ic)} = & 10 \log \left(P_{Max}^{TX_i(ic)*} \cdot N_{SD} \cdot N_{Slot} \cdot N_{SF-DL}^{TX_i(ic)} \right) \\ & - 10 \log \left(N_{Sym-DLRS}^{TX_i(ic)} + N_{Sym-SS} \cdot \Delta EPRE_{SS}^{TX_i(ic)*} + N_{Sym-PBCH} \right. \\ & \cdot \Delta EPRE_{PBCH}^{TX_i(ic)*} + N_{Sym-PDCCH} \cdot \Delta EPRE_{PDCCH}^{TX_i(ic)*} + N_{Sym-PDSCH} \\ & \left. \cdot \Delta EPRE_{PDSCH}^{TX_i(ic)*} \right) \end{aligned}$$

Todos los elementos que tengan “*” son valores en dB que han de transformarse a lineal para poder ser usados en la fórmula.

Donde,

- **$P_{Max}^{TX_i(ic)}$** : potencia máxima de la celda $TX_i(ic)$.

- $N_{SD/Slot}$: número de símbolos por slot (7 para prefijo cíclico normal, 6 para extendido)
- $N_{Slot/SF}$: número de slots por subtrama (igual a 2).
- $N_{SF-DL}^{TX_i(ic)}$: número de subtramas *downlink* dentro de la trama de la celda $TX_i(ic)$ (igual a 10 para FDD).
- $N_{Sym-DLRS}^{TX_i(ic)}$: número de símbolos modulados de la señal de referencia *downlink* por trama.
- $\Delta EPRE_{XX}^{TX_i(ic)}$: es el *offset* de energía por recurso elemental de XX con respecto al EPRE de las señales de referencia (valor puesto a cero a lo largo de todo el proyecto).
- N_{Sym-XX} : número de símbolos modulados de la señal/canal XX.

Cálculo de Interferencia – DL

Las interferencias recibidas en cualquier pixel, suscriptor, o móvil servido por la celda $TX_i(ic)$ proveniente de otras celdas $TX_j(jc)$ puede ser definido como los niveles de señal recibidos de celdas interferentes $TX_j(jc)$ dependiendo de la superposición que exista entre los canales usados por las celdas $TX_i(ic)$ y $TX_j(jc)$, en la carga de tráfico de las celdas interferentes $TX_j(jc)$, y si la celda soporta ICIC o no.

La energía interferente por recurso elemental (dBm/Sym) recibido sobre el PDSCH y PDCCH proveniente de cualquier celda $TX_j(jc)$ en un píxel, suscriptor o móvil M_i es calculado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{PDSCH, PDCCH}^{TX_j(jc)} = 10 \log & \left(E_{DLRS}^{TX_j(jc)*} \cdot \frac{N_{Sym-DLRS}^{TX_j(jc)}}{N_{Sym-DL}^{TX_j(jc)}} + E_{PDCCH}^{TX_j(jc)*} \cdot \frac{N_{Sym-PDCCH}^{TX_j(jc)}}{N_{Sym-DL}^{TX_j(jc)}} + E_{PDSCH}^{TX_j(jc)*} \right. \\ & \left. \cdot f_{ICIC-DL}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)*} \cdot \frac{N_{Sym-PDSCH}^{TX_j(jc)}}{N_{Sym-DL}^{TX_j(jc)}} \cdot TL_{DL}^{TX_j(jc)} \right) + f_o^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} + f_{MIMO}^{TX_j(jc)} \end{aligned}$$

Todos los elementos que tengan “*” son valores en dB que han de transformarse a lineal para poder ser usados en la fórmula.

Donde,

- $E_{DLRS}^{TX_j(jc)}$: energía de señal de referencia por recurso elemental recibida, proveniente de cualquier celda interferente $TX_j(jc)$ sobre el píxel, suscriptor o móvil M_i cubierto por la celda $TX_i(ic)$
- $N_{Sym-DL}^{TX_j(jc)}$: número de recursos elementales totales en el *downlink*.
- $N_{Sym-DLRS}^{TX_j(jc)}$: número de recursos elementales de la señal de referencia en el *downlink*.
- $E_{PDCCH}^{TX_j(jc)}$: energía PDCCH por recurso elemental recibida, proveniente de cualquier celda interferente $TX_j(jc)$ sobre el píxel, suscriptor o móvil M_i cubierto por la celda $TX_i(ic)$
- $N_{Sym-PDCCH}^{TX_j(jc)}$: numero de recursos elementales PDCCH.
- $E_{PDSCH}^{TX_j(jc)}$: energía PDSCH por recurso elemental recibida, proveniente de cualquier celda interferente $TX_j(jc)$ sobre el píxel, suscriptor o móvil M_i cubierto por la celda $TX_i(ic)$
- $N_{Sym-PDSCH}^{TX_j(jc)}$: numero de recursos elementales PDSCH.
- $TL_{DL}^{TX_j(jc)}$: carga de tráfico *downlink* de la celda interferente $TX_j(jc)$.
- $f_o^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$: reducción de la interferencia debido a solapamiento cocanal y de canal adyacente entre la celda $TX_i(ic)$ y $TX_j(jc)$.
- $f_{MIMO}^{TX_j(jc)}$: es el incremento de interferencia debido al uso de más de un puerto de antena de transmisión.
- $f_{ICIC-DL}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$: factor de reducción de interferencia debido al uso de ICIC DL. La explicación de cómo obtener el valor de este factor se presenta en los siguientes párrafos.

Si la celda soporta *static* DL ICIC, significa que una parte de la trama que es reservada para el uso de los usuarios de borde de celda puede usar una fracción del ancho de banda de canal. Esto tiene como consecuencia dos efectos:

1. Concentración de potencia, lo que significa que la densidad espectral de la potencia transmitida sobre una fracción de canal es mayor que la densidad espectral de la misma potencia transmitida sobre el ancho de banda del canal completo. El efecto de la concentración de potencia es visible cuando se calcula el C/N y el C/(I+N). El incremento en la potencia debido a esta concentración de potencia es equivalente a una reducción del valor ruido más interferencia (I+N). Por lo tanto en el caso de *static* ICIC *downlink* la interferencia se reduce en el pixel, suscriptor o móvil M_i que está asignado en la parte ICIC de la trama LTE.
2. Probabilidad de colisión entre subportadoras usadas por las fracciones de los canales que están siendo usados por la celda interferida y las celdas interferentes. A continuación se explica cómo es calculada la probabilidad de colisión.

El ICIC Ratio es el porcentaje de la carga de tráfico total presente en la parte ICIC de la trama. Por ejemplo si la carga de tráfico *downlink* es 80% y el ICIC Ratio es 50%, entonces esto significa que la carga de tráfico *downlink* correspondiente tanto a la parte ICIC como a la No-ICIC de la trama es del 40%.

En predicciones de cobertura, Atoll utiliza ICIC ratios almacenados en las propiedades de la celda para determinar la interferencia. En simulaciones, Atoll reinicia el ICIC ratio de todas las celdas a 0, y después las calcula de acuerdo a la carga de tráfico de los móviles asignados a la parte ICIC y No-ICIC de la trama utilizando la siguiente fórmula:

$$r_{DL-ICIC}^{TX_i(ic)} = \frac{\sum_{M_i^{ICIC}} R_{DL}^{M_i^{ICIC}}}{TL_{DL}^{TX_i(ic)}}$$

Donde, $\sum_{M_i^{ICIC}} R_{DL}^{M_i^{ICIC}}$ es la suma de los porcentajes de recursos en el *downlink* asignados a móviles en la parte ICIC de la trama.

Atoll determina los puntos de cambio temporal entre las partes ICIC y No-ICIC de la trama usando el ICIC ratio. Los puntos de cambio entre las partes ICIC y No-ICIC de la trama pertenecientes a la celda víctima y a las celdas interferentes, $TX_i(ic)$ y $TX_j(jc)$ respectivamente, son calculados de la siguiente forma:

$$SP^{TX_i(ic)} = \frac{r_{DL-ICIC}^{TX_i(ic)}}{r_{DL-ICIC}^{TX_i(ic)} + \left(1 - r_{DL-ICIC}^{TX_i(ic)}\right) \cdot \frac{N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}}{N_{FB}^{TX_i(ic)}}}$$

$$SP^{TX_j(jc)} = \frac{r_{DL-ICIC}^{TX_j(jc)}}{r_{DL-ICIC}^{TX_j(jc)} + \left(1 - r_{DL-ICIC}^{TX_j(jc)}\right) \cdot \frac{N_{FB-CE}^{TX_j(jc)}}{N_{FB}^{TX_j(jc)}}}$$

Donde,

- **SP**: es el punto de cambio (*Switching Point*) entre la parte ICIC y no-ICIC de la trama.
- $r_{DL-ICIC}$: es el *downlink* ICIC ratio de las celdas.
- $N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}$: número de bloques de frecuencia para borde de celda (usado en las áreas de borde de celda en caso de utilizar ICIC), determinado de la lista de bloques correspondientes al PSS ID de la celda (0, 1 ó 2) definido en la configuración ICIC asignada a la celda $TX_i(ic)$. Por defecto (si ninguna configuración ICIC es asignado a la celda), $N_{FB-CE}^{TX_i(ic)} = N_{FB}^{TX_i(ic)} / 3$.
- $N_{FB-CE}^{TX_j(jc)}$: análogo al caso $N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}$, pero para la celda interferente $TX_j(jc)$.
- $N_{FB}^{TX_i(ic)}$: número de bloques de frecuencia, definidos en la tabla de bandas de frecuencia, para el ancho de banda de canal utilizado por la celda.
- $N_{FB}^{TX_j(jc)}$: análogo a $N_{FB}^{TX_i(ic)}$, pero para la celda interferente $TX_j(jc)$.

Cuando las celdas utilizan *static ICIC downlink* pueden presentarse cuatro escenarios distintos:

- a) Entre la parte ICIC de la víctima y la parte ICIC del interferente.
- b) Entre la parte ICIC de la víctima y la parte no-ICIC del interferente.
- c) Entre la parte no-ICIC de la víctima y la parte ICIC del interferente.
- d) Entre la parte no-ICIC de la víctima y la parte no-ICIC del interferente.

Por lo tanto, Atoll calcula las probabilidades de colisión para cada escenario y pondera la interferencia total de acuerdo a la probabilidad total de colisión. La probabilidad de colisión (p_{coll}) para cada escenario se observa en la siguiente tabla:

Caso	Celda interferida $TX_i(ic)$	Celda interferente $TX_j(jc)$	p_{coll}
a	ICIC	ICIC	$\frac{N_{FB-CE}^{Common}}{N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}}$
b	ICIC	No-ICIC	1
c	No-ICIC	ICIC	$\frac{N_{FB-CE}^{Common}}{N_{FB}^{TX_i(ic)}}$
d	No-ICIC	No-ICIC	1

Donde, N_{FB-CE}^{Common} es el número de bloques de frecuencia comunes, utilizados en el borde de celda entre $TX_i(ic)$ y $TX_j(jc)$.

Pueden existir dos casos para calcular la probabilidad total de colisión:

- **Caso 1:** si el pixel, suscriptor o móvil M_i es cubierto por la parte ICIC de $TX_i(ic)$:

$$p_{Collision}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} = \begin{cases} p_{Coll}^a, & \text{si } SP^{TX_j(jc)} \geq SP^{TX_i(ic)} \\ \frac{p_{Coll}^a \cdot SP^{TX_j(jc)} + p_{Coll}^b \cdot (SP^{TX_i(ic)} - SP^{TX_j(jc)})}{SP^{TX_i(ic)}}, & \text{si } SP^{TX_j(jc)} < SP^{TX_i(ic)} \end{cases}$$

- **Caso 2:** si el pixel, suscriptor o móvil M_i es cubierto por la zona no segmentada del transmisor $TX_i(ic)$:

$$p_{Collision}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} = \begin{cases} p_{Coll}^d, & \text{si } SP^{TX_j(jc)} \leq SP^{TX_i(ic)} \\ \frac{p_{Coll}^d \cdot (1 - SP^{TX_j(jc)}) + p_{Coll}^c \cdot (SP^{TX_j(jc)} - SP^{TX_i(ic)})}{(1 - SP^{TX_i(ic)})}, & \text{si } SP^{TX_j(jc)} \geq SP^{TX_i(ic)} \end{cases}$$

Por lo tanto el factor de reducción de interferencia debido al uso de *static ICIC downlink* para pixel, suscriptor o móvil M_i es igual a:

$$f_{ICIC-DL}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} = 10 \log \left(p_{Collision}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} \right)$$

Cálculo de Ruido – DL

Para determinar la C/N y la C/(I+N), Atoll calcula el ruido *downlink* sobre el ancho de banda usado por la celda para transmitir diferentes canales. El ancho de banda usado depende del número de subportadoras usadas para transmisión.

El ruido *downlink* comprende el ruido térmico y la figura del ruido del equipo. La densidad de ruido térmico depende de la temperatura, es decir, se mantiene constante para una cierta temperatura. Sin embargo, el valor del ruido térmico varía con el ancho de banda utilizado.

El ruido en el *downlink* para un recurso elemental se calcula de la siguiente forma:

$$n_{Sym}^{TX_i(ic)} = n_{0-Sym}^{TX_i(ic)} + n f^{M_i}$$

Donde,

- $n_{0-Sym}^{TX_i(ic)}$: ruido térmico para un recurso elemental.

- nf^{M_i} : figura de ruido del móvil M_i .

Asimismo el ruido térmico posee la siguiente fórmula:

$$n_{0-sym}^{TX_i(ic)} = n_0 + 10 \log(\Delta F)$$

Donde,

- n_0 : la densidad espectral del ruido térmico (es igual a -174dBm/Hz).
- ΔF : Ancho de subportadora (15kHz).

2. Cálculo de PUSCH C/(I+N)

La relación portadora a interferencia más ruido es calculada en tres pasos. En el primero, Atoll calcula los niveles de señal recibida provenientes de cada pixel, suscriptor o móvil hacia su celda servidora, utilizando la potencia efectiva del terminal utilizado como se explica más adelante en la sección Cálculo de Nivel de Señal – UL. Después, se calcula la relación portadora a ruido en el *uplink* como se explica después en Cálculo de C/N – UL. Finalmente, se determina la relación C/(I+N) dividiendo el valor de C/N previamente calculado entre el valor de *uplink noise rise* de la celda (considerando que dicho valor puede estar definido en la tabla de celdas directamente o pueda ser un resultado de las simulaciones de Monte Carlo) el cual se calcula como se indica a continuación en la sección Cálculo de Interferencia UL.

Para cualquier pixel, suscriptor o móvil M_i cubierto por la zona no-ICIC en la celda interferida $TX_i(ic)$, el PUSCH se calcula como:

$$CINR_{PUSCH}^{M_i} = CNR_{PUSCH}^{M_i} - NR_{UL}^{TX_i(ic)}$$

Para cualquier pixel, suscriptor o móvil M_i cubierto por la zona ICIC en la celda interferida $TX_i(ic)$, el PUSCH se calcula como:

$$CINR_{PUSCH}^{M_i} = CNR_{PUSCH}^{M_i} - NR_{UL-ICIC}^{TX_i(ic)}$$

Donde,

- $CNR_{PUSCH}^{M_i}$: es el PUSCH C/N de un pixel, suscriptor o móvil M_i servido por la celda $TX_i(ic)$.
- $NR_{UL}^{TX_i(ic)}$: *uplink noise rise* para la celda $TX_i(ic)$
- $NR_{UL-ICIC}^{TX_i(ic)}$: ICIC *uplink noise rise* para la celda $TX_i(ic)$.

Cálculo de Nivel de Señal – UL

Atoll primero calcula la potencia máxima permitida para el terminal usado por el píxel, suscriptor o móvil M_i . Esta potencia es calculada ejecutando un control de potencia fraccionario (*Fractional Power Control*).

Fractional Power Control

El control fraccionario de potencia impone una limitación de la máxima potencia de transmisión del terminal. Un valor nominal de potencia de PUSCH se indica por la celda para todos los píxeles, suscriptores o móviles. Dicho valor nominal se calcula de la siguiente forma:

$$P_{O_PUSCH}^{TX_i(ic)} = CINR_{PUSCH-Max}^{TX_i(ic)} + NR_{UL}^{TX_i(ic)} + n_{PUSCH}^{TX_i(ic)} - 10 \log(N_{FB}^{TX_i(ic)}), \text{ para la zona No} \\ - ICIC$$

$$P_{O_PUSCH}^{TX_i(ic)} = CINR_{PUSCH-Max}^{TX_i(ic)} + NR_{UL-ICIC}^{TX_i(ic)} + n_{PUSCH}^{TX_i(ic)} - 10 \log(N_{FB}^{TX_i(ic)}), \text{ para la zona ICIC}$$

Donde,

- $n_{PUSCH}^{TX_i(ic)} - 10 \log(N_{FB}^{TX_i(ic)})$: corresponde con el ruido *uplink* sobre un bloque de frecuencia (*frequency block*).
- $CINR_{PUSCH-Max}^{TX_i(ic)}$: Máximo valor de PUSCH C/(I+N) indicado en la tabla de celdas.

Seguidamente, la potencia máxima de transmisión permitida para un terminal usado por píxel, suscriptor o móvil M_i se calcula como:

$$P_{Allowed}^{M_i} = \text{Min} \left\{ P_{Max}^{M_i}, 10 \log \left(N_{FB}^{TX_i(ic)} \right) + P_{O_PUSCH}^{TX_i(ic)} + \alpha_{FPC}^{TX_i(ic)} \cdot L_{Total} \right\}$$

Donde,

- $P_{Max}^{M_i}$: máxima potencia de transmisión del terminal usada por el píxel, suscriptor o móvil M_i .
- $N_{FB}^{TX_i(ic)}$: número de bloques de frecuencia, definidos en la tabla de bandas de frecuencia, para el ancho de banda de canal utilizado por la celda $TX_i(ic)$.
- $\alpha_{FPC}^{TX_i(ic)}$: factor de control de potencia fraccional definido para la celda $TX_i(ic)$.
- L_{Total} : pérdidas totales.

Una vez calculado la potencia máxima permitida, es utilizada como límite superior de potencia de transmisión para el resto de cálculos.

El nivel de señal PUSCH recibido proveniente de píxel, suscriptor o móvil M_i en su celda servidora $TX_i(ic)$ se calcula de la siguiente forma:

$$C_{PUSCH}^{M_i} = EIRP_{PUSCH}^{M_i} - L_{Path} - M_{Shadowing-Model} - L_{Indoor} + G_{Ant}^{TX_i} - L^{TX_i} - L_{Ant}^{M_i} - L_{Body} + f_{CP}$$

Donde,

- L_{Path} : pérdidas de propagación determinada por la suma de las pérdidas calculadas por el modelo de propagación y la atenuación de la antena del transmisor (patrones de antena).
- $M_{Shadowing-Model}$: margen de *shadowing* basado en la desviación estándar del modelo. En las predicciones de cobertura, se toma en cuenta sólo si la opción se encuentra activada dentro de las propiedades.
- L_{Indoor} : pérdidas en interiores, tomadas en cuenta cuando la opción de cobertura en interiores se encuentra activa. (Nula para el desarrollo de este proyecto).

- $G_{Ant}^{TX_i}$: Ganancia de la antena transmisora usada por el transmisor TX_i .
- L^{TX_i} : Pérdidas totales para el transmisor TX_i ($L^{TX_i} = L_{Total-UL}$).
- f_{CP} : factor de prefijo cíclico. Es la relación entre la energía de símbolo útil y la energía total de símbolo.
- $EIRP_{PUSCH}^{M_i} = P^{M_i} + G^{M_i} - L^{M_i}$ (Potencia isotrópica radiada efectiva del terminal)
 - $P^{M_i} = P_{Allowed}^{M_i}$ sin ajustes de control de potencia al inicio de los cálculos ó
 - $P^{M_i} = P_{Eff}^{M_i}$ después de los ajustes de control de potencia.

Cálculo de Ruido – UL

Para determinar la C/N y C/(I+N), Atoll calcula el ruido *uplink* sobre el ancho de banda del canal usado por la celda. El ancho de banda usado depende del número de subportadoras que se estén utilizando.

El ruido *uplink* comprende el ruido térmico y la figura de ruido del equipo. La densidad de ruido térmico depende de la temperatura, por ejemplo, se mantiene constante para una misma temperatura. Sin embargo, el valor del ruido térmico varía con el ancho de banda utilizado.

El ruido térmico *uplink* tiene la siguiente fórmula en Atoll:

$$n_{PUSCH}^{TX_i(ic)} = n_{0-PUSCH}^{TX_i(ic)} + nf^{TX_i(ic)}$$

Donde,

- $n_{0-PUSCH}^{TX_i(ic)} = n_0 + 10 \log \left(N_{FB}^{TX_i(ic)} \cdot W_{FB} \cdot 1000 \right)$ (Ruido térmico para PUSCH)
 - W_{FB} : ancho de un bloque de frecuencia (180kHz).
 - n_0 : densidad espectral de ruido térmico.
- $nf^{TX_i(ic)}$: figura de ruido de la celda $TX_i(ic)$.

Cálculo de Interferencia – UL

La interferencia PUSCH es solo calculada durante las simulaciones de Monte Carlo. En las predicciones los valores de *uplink noise rise* se pueden tomar a partir de los resultados de las simulaciones o de la información dentro de la tabla de celdas.

Cálculo de Nivel de señal de Interferencia

La interferencia recibida en la celda $TX_i(ic)$ proveniente de un móvil cubierto por una celda $TX_j(jc)$ se calcula de la siguiente forma:

$$I_{PUSCH}^{M_j} = C_{PUSCH}^{M_j} + f_o^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} + f_{TL-UL}^{M_j} + f_{ICIC-UL}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$$

Donde,

- $f_{TL-UL}^{M_j} = 10 \log(TL_{UL}^{M_j})$ (factor de reducción de interferencia debido a la carga de tráfico *uplink* del móvil interferente M_j).
 - $TL_{UL}^{M_j}$: carga de tráfico *uplink* del móvil interferente M_j .
- $f_o^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$: reducción de la interferencia debido al solapamiento cocanal y de canal adyacente entre la celda $TX_i(ic)$ y $TX_j(jc)$.
- $f_{ICIC-UL}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$: factor de reducción de interferencia debido al uso de ICIC UL. La explicación de cómo obtener el valor de este factor se presenta en los siguientes párrafos.

Si la celda soporta *static* UL ICIC, significa que una parte de la trama LTE puede usar una fracción del ancho de banda de canal. El factor de reducción de interferencia debido al uso de ICIC *uplink* se calcula como:

$$f_{ICIC-UL}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)} = 10 \log(p_{Collision}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)})$$

Donde la $p_{Collision}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$, es la probabilidad de colisión entre las subportadoras usadas por las fracciones de canal que utilizan las celdas interferidas e

interferentes. Se determina durante las simulaciones de Monte Carlo como se muestra a continuación:

Caso	Celda interferida $TX_i(ic)$	Celda interferente $TX_j(jc)$	$p_{Collision}^{TX_i(ic)-TX_j(jc)}$
a	ICIC	ICIC	$\frac{N_{FB-CE}^{Common}}{N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}}$
b	ICIC	No-ICIC	1
c	No-ICIC	ICIC	$\frac{N_{FB-CE}^{Common}}{N_{FB}^{TX_i(ic)}}$
d	No-ICIC	No-ICIC	1

Donde, N_{FB-CE}^{Common} es el número de bloques de frecuencia comunes, utilizados en el borde de celda comunes entre $TX_i(ic)$ y $TX_j(jc)$, y $N_{FB}^{TX_i(ic)}$ es el número de bloques frecuenciales utilizados para el borde de celda por la celda $TX_i(ic)$.

En las simulaciones de Monte Carlo, se calcula dos valores de *uplink noise rise*, para los móviles en la zona ICIC (ICIC UL *noise rise*) y para los ubicados en la zona no ICIC (UL *noise rise*).

En las predicciones, si la ubicación del pixel estudiado está o no en la zona ICIC, Atoll utiliza el UL *noise rise* o el ICIC UL *noise rise* respectivamente, para calcula el PUSCH C/(I+N).

Cálculo de Noise Rise (uplink)

El *uplink noise rise* se define como la relación entre toda la interferencia recibida por la celda $TX_i(ic)$ proveniente de todos los móviles presentes en el area de cobertura de todas las otras celdas $TX_j(jc)$, con el ruido *uplink* de la celda $TX_i(ic)$, es decir, es igual a (I+N)/N.

Para cualquier móvil M_i cubierto por la zona no-ICIC dentro de la celda interferida $TX_i(ic)$, Atoll calcula el UL *noise rise* como:

$$NR_{UL}^{TX_i(ic)} = 10 \log \left(\sum_{\substack{\text{Todos los } M_j \\ \text{Todos } TX_j(jc)}} \left(10^{\frac{I_{PUSCH \forall M_i No-ICIC}^{M_j}}{10}} + 10^{\frac{n_{PUSCH}^{TX_i(ic)}}{10}} \right) + NR_{UL}^{Inter-Tech} - n_{PUSCH}^{TX_i(ic)} \right)$$

De igual forma para cualquier móvil M_i cubierto por la zona ICIC dentro de la celda interferida $TX_i(ic)$, Atoll calcula el ICIC UL *noise rise* como:

$$NR_{UL-ICIC}^{TX_i(ic)} = 10 \log \left(\sum_{\substack{\text{Todos los } M_j \\ \text{Todos } TX_j(jc)}} \left(10^{\frac{I_{PUSCH \forall M_i ICIC}^{M_j}}{10}} + 10^{\frac{n_{PUSCH}^{TX_i(ic)}}{10}} \right) + NR_{UL}^{Inter-Tech} - n_{PUSCH}^{TX_i(ic)} \right)$$

Donde,

- **$NR_{UL}^{Inter-Tech}$** : *noise rise* de inter-tecnología en el *uplink*. (Valor nulo para los estudios realizados en este proyecto).

Cálculo de C/N – UL

Para cualquier pixel, suscriptor o móvil M_i servido por la celda $TX_i(ic)$, el PUSCH C/N se calcula como:

$$CNR_{PUSCH}^{M_i} = C_{PUSCH}^{M_i} - n_{PUSCH}^{TX_i(ic)}$$

La asignación de anchos de banda (recursos) puede provocar en el uso de un número de bloques frecuenciales inferiores a los asociados con el ancho de banda de todo el canal de la celda. La ganancia relacionada a esta disminución del uso de la banda utilizada se aplica al PUSCH C/N de forma que:

$$CNR_{PUSCH \text{ Final}}^{M_i} = CNR_{PUSCH \text{ All FB}}^{M_i} + 10 \log \left(\frac{N_{FB}^{TX_i(ic)}}{N_{FB-UL}^{M_i}} \right)$$

Donde $N_{FB-UL}^{M_i} < N_{FB}^{TX_i(ic)}$ para cualquier píxel, suscriptor o móvil M_i cubierto por la zona no-ICIC de la celda interferida $TX_i(ic)$ y $N_{FB-UL}^{M_i} < N_{FB-ICIC}^{TX_i(ic)}$ para aquellos de la zona ICIC de la misma celda.

Una vez obtenido este valor, se reduce la potencia hasta alcanzar la potencia efectiva de transmisión ($P_{Eff}^{M_i}$) que corresponde con el valor de potencia mínimo necesario¹ para alcanzar el umbral del radio *bearer* que fue asignado al píxel, suscriptor o móvil M_i . Dicha potencia se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$P_{Eff}^{M_i} = \text{Max} \left(P_{Allowed}^{M_i} - \left(\text{CNR}_{PUSCH}^{M_i} - \left(T_{M_i, BUL}^{TX(i)c} + M_{PC} \right) \right), P_{Min}^{M_i} \right)$$

Donde,

- $T_{M_i, BUL}^{TX(i)c}$: es el umbral de selección del radio bearer asignado al pixel, suscriptor o móvil
- M_{PC} : margen de ajuste de control de potencia definido en los *Global Parameters* (igual a 1 dB para este proyecto).
- $P_{Min}^{M_i}$: potencia mínima de transmisión del terminal usado por el pixel, suscriptor o móvil.

Finalmente se calcula el $\text{CNR}_{PUSCH}^{M_i}$ nuevamente utilizando el valor de $P_{Eff}^{M_i}$.

¹ Una vez se haya actualizado el valor de $\text{CNR}_{PUSCH}^{M_i}$ según el ancho de banda que se le haya asignado al pixel, suscriptor o móvil a través del *scheduler*, es decir, $\text{CNR}_{PUSCH}^{M_i} = \text{CNR}_{PUSCH, Final}^{M_i}$.

APÉNDICE C

CÁLCULO DE PEAK RLC CHANNEL THROUGHPUT

Los *throughputs* de los canales son calculados para la cantidad total de recursos asignados al píxel, suscriptor o móvil M_i .

Throughput Downlink

La velocidad de pico en el *downlink* del canal RLC para el píxel, suscriptor o móvil M_i se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$CTP_{P-DL}^{M_i} = \frac{R_{DL}^{TX_i(ic)} \cdot \eta_{B_{DL}}^{M_i}}{D_{Frame}}$$

Donde,

- $R_{DL}^{TX_i(ic)}$: el número total de recursos de la celda en el *downlink*. Se calcula a través de la resta entre los símbolos totales modulados (recursos elementales) en el *downlink* y aquellos símbolos utilizados para la cabecera de los diferentes canales y señales.
- $\eta_{B_{DL}}^{M_i}$: eficiencia de *bearer* (bits/símbolo) asignado al píxel, suscriptor o móvil M_i en el *uplink*.
- D_{Frame} : duración de la trama.

Asimismo en caso de que el píxel, suscriptor o móvil M_i esté cubierto por la parte ICIC de la trama, entonces la velocidad de pico del canal RLC se calcula como:

$$\frac{R_{DL}^{TX_i(ic)} \cdot \eta_{B_{DL}}^{M_i}}{D_{Frame}} \cdot \frac{N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}}{N_{FB}^{TX_i(ic)}}$$

Donde,

- $N_{FB-CE}^{TX_i(ic)}$: número de bloques de frecuencia para borde de celda (usado en las áreas de borde de celda en caso de utilizar ICIC), determinado de la lista de bloques

correspondientes al PSS ID de la celda (0, 1 ó 2) definido en la configuración ICIC asignada a la celda $TX_i(ic)$. Por defecto (si ninguna configuración ICIC es asignado a la celda), $N_{FB-CE}^{TX_i(ic)} = N_{FB}^{TX_i(ic)} / 3$.

- $N_{FB}^{TX_i(ic)}$: número de bloques de frecuencia, definidos en la tabla de bandas de frecuencia, para el ancho de banda de canal utilizado por la celda.

De igual forma el *Effective RLC Channel Throughput* para el *downlink* se calcula utilizando la formula que se muestra a continuación:

$$CTP_{E-DL}^{M_i} = CTP_{P-DL}^{M_i} \cdot (1 - BLER(B_{DL}^{M_i}))$$

Donde,

$BLER(B_{DL}^{M_i})$: es el *Downlink Block Error Rate*, valor obtenido de las propiedades del terminal asociado al píxel, suscriptor o móvil M_i . BLER es determinado según el valor de $CINR_{PDSCH}^{TX_i(ic)}$.

Throughput Uplink

La velocidad de pico en el *uplink* del canal RLC para el píxel, suscriptor o móvil M_i se calcula utilizando la siguiente fórmula:

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

Donde,

- $R_{UL}^{TX_i(ic)}$: el número total de recursos de la celda en el *uplink*. Se calcula a través de la resta entre los símbolos totales modulados (recursos elementales) *uplink* y aquellos símbolos utilizados para la cabecera de los diferentes canales y señales.
- $\eta_{B_{UL}}^{M_i}$: eficiencia de *bearer* (bits/símbolo) asignado al píxel, suscriptor o móvil M_i en el *uplink*.
- D_{Frame} : duración de la trama.

Asimismo el *Effective RLC Channel Throughput* para el *uplink* se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$CTP_{E-UL}^{M_i} = CTP_{P-UL}^{M_i} \cdot (1 - BLER(B_{UL}^{M_i}))$$

Donde,

$BLER(B_{UL}^{M_i})$: es el *Uplink Block Error Rate*, valor obtenido de las propiedades del terminal asociado al terminal $TX_i(ic)$. BLER es determinado según el valor de $CINR_{PUSCH}^{M_i}$.

ANEXO A

BANDAS DEFINIDAS PARA LTE

Bandas identificadas para el despliegue de LTE en la *Release*: 3GPP TS36. 101 v8.8.0 “Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) User Equipment (UE) radio transmission and reception”, Diciembre 2009. [1]

Banda LTE	Banda para UL	Banda para DL	Tipo de Duplexado
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1452.9 MHz	1475.9 MHz – 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD