



Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior de Leganés

Alumna: Teresa Irene Téllez y García

Tutor: Ángel María Bravo Santos



[DESPLIEGUE DE UNA RED LTE EN UNA ZONA RURAL AL SURESTE DE MADRID]

En el presente proyecto se describen los criterios técnicos de planificación de la red de telefonía móvil LTE, que dotará de cobertura a varias localidades rurales.

Junio de 2013



RESUMEN

Este proyecto nace de la propuesta de realización de un despliegue de una red LTE en un entorno rural.

Se basa en la planificación de una red LTE en un entorno rural. El estudio de los parámetros que relacionan la potencia transmitida por elementos de la red y los efectos del ruido y la distancia, determinan el despliegue de la red. Se aplicarán estrategias de cancelación de interferencias, reutilización de frecuencias y se emplearán distintas modulaciones.

La herramienta clave para poder desarrollar este proyecto es el software Radio Mobile [1], que permite realizar simulaciones de la red diseñada para comprobar si el diseño es adecuado.

El modelo de pérdidas que esta herramienta implementa, considera varios factores como causantes de que la señal se atenúe.



ABSTRACT

This project is a proposal made as an extension of planning conducted in a no urban environment.

It is based on the LTE network planning in an no urban environment. The study of parameters that relate the power transmitted by the network elements and the effects of noise and distance determines the network deployment. Apply interference cancellation strategies, frequency reuse and employ different modulations.

The key tool for this project is to develop software Radio Mobile, which allows network simulations designed to check if the design is adequate.

The loss model that implements this tool considers various factors to cause the signal is attenuated.



INTRODUCCIÓN	1
1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	3
1.1 PROPUESTA	3
1.2 OBJETO DEL PROYECTO	3
1.3 CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN	3
1.4 LIMITACIONES Y ALCANCES	4
1.4.1 LIMITACIONES	4
2 EVOLUCIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES. REDES 4G.	5
2.1 ALCANCES	5
2.2 ANTECEDENTES DE LA RED LTE	5
2.2.1 0G PRECELULARES: LAS PRIMERAS REDES	5
2.2.2 1G LA ERA ANALÓGICA CELULAR	5
2.2.3 2G POPULARIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN	6
2.2.4 2,5G DATOS E INTERNET	6
2.2.5 3G ESPECTRO ENSANCHADO	6
2.2.6 3,5G TRANSICIÓN ACTUAL	7
2.2.7 4G ACTUALIDAD O FUTURO INMEDIATO	7
2.3 LA RED LTE (Long Term Evolution)	8
2.4 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA LTE	9
2.5 MODULACIONES LTE – TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO	12
2.5.1 MODULACIÓN Y TÉCNICA DE ACCESO AL MEDIO SIMULTÁNEA (OFDMA)	14
2.5.2 MODULACIÓN SC-FDMA	16
2.5.3 MIMO	18
2.5.4 INTERFAZ RADIO	18
2.6 REQUISITOS DEFINIDOS POR LA ITU PARA LTE	23
2.6.1 TASA BINARIA DE PICO	23
2.6.2 LATENCIA	23
2.6.3 EFICIENCIA ESPECTRAL	24
2.6.4 “THROUGHPUT” DE USUARIO EN EL BORDE DE LA CÉLULA	24
2.6.5 MOVILIDAD	24
2.6.6 COBERTURA	24
2.6.7 FLEXIBILIDAD ESPECTRAL	24
2.7 MEJORAS EN EL RENDIMIENTO DE LAS REDES LTE	25
3 GESTIÓN DE RECURSOS DE LA RED	27
3.1 FUNCIONAMIENTO DE LA RED MOVIL	27



3.2	PLANIFICACIÓN DE RADIO FRECUENCIA DE LA RED LTE	31
4	TRÁFICO	32
4.1	GESTIÓN DE TRÁFICO LTE – TRÁFICO IP	32
4.2	TRÁFICO VoIP vs VoLTE	33
4.2.1	¿CÓMO SE CURSAN LAS LLAMADAS?	34
4.2.2	ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS RADIO	34
4.3	MODELO MATEMATICO QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO EN INTERNET	37
5	PLANIFICACIÓN	43
5.1	OBJETIVO: DESPLIEGUE DE UNA RED LTE EN EL SURESTE DE MADRID 43	
5.2	PANORÁMICA DEL DESPLIEGUE	43
5.3	CALIDAD DE SERVICIO	43
5.4	MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN	44
5.5	MODELOS DE PROPAGACIÓN	46
5.5.1	OKUMURA – HATA	47
5.5.2	MODELO COST-231	48
5.5.3	MODELO LONGLEY AND RICE	48
6	DESPLIEGUE DE LA RED	53
6.1.1	CONFIGURACIÓN INICIAL	53
6.1.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS QUE FORMAN LA RED	53
6.1.3	UBICACIÓN DE USUARIOS Y NODOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	54
6.1.4	ESTUDIOS DEL NIVEL DE LA SEÑAL	54
6.1.5	CÁLCULO DE LA SEÑAL RSRP	57
6.1.6	ESTUDIO DEL ENLACE DESCENDENTE	60
6.1.7	DISEÑO DE LA RED	69
6.1.8	REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS	70
7	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	78
7.1	CONCLUSIONES	78
7.2	LÍNEAS FUTURAS	78
8	PRESUPUESTO	79
9	BIBLIOGRAFÍA	81
10	ANEXO I	83
11	ANEXO II	90
11.1	RADIO MOBILE	90
11.1.1	CONCEPTOS RADIO MOBILE	90



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1-1: Penetración de Servicios en el Mundo 1

Figura 2-1 Diferencias en el reuso de frecuencias entre los sistemas pre-celulares (0G) y celulares (1G) 5

Figura 2-2: Evolución de los sistemas de telefonía Móvil 8

Figura 2-3: Sistema EPS 9

Figura 2-4: Red de acceso EUTRAN e interfaces 10

Figura 2-5: Pila de protocolos de usuario..... 11

Figura 2-6: Pila de protocolos 11

Figura 2-7: Modelo de Red LTE 12

Figura 2-8: Transmisor de portadora única. 12

Figura 2-9: Transmisor basado en concepto FDMA..... 13

Figura 2-10: transmisor basado en concepto de Multiportadora..... 13

Figura 2-11: Espectro correspondiente a 4 subportadoras OFDM 14

Figura 2-12: Transmisor y Receptor OFDMA 15

Figura 2-13: Multiplexación de usuarios en OFDMA 15

Figura 2-14: Transmisor y Receptor SC-FD 16

Figura 2-15: Multiplexación de usuarios con SCFDMA 17

Figura 2-16: Protocolos de la Interfaz aire del sistema LTE 19

Figura 2-17: RB en trama OFDMA 20

Figura 2-18: Duración de la trama..... 21

Figura 2-19 :Señales de referencia en un RB 22

Figura 3-1 : Asignación de recursos utilizando diversidad multiusuario..... 28

Figura 3-2: ICI..... 30

Figura 4-1: OFDMA rejilla LTE para 5 MHz de Ancho de Banda..... 35

Figura 4-2: Ejemplo de asignación de un TB 36

Figura 4-3: Esquema del algoritmo de asignación en el DL 37

Figura 4-4: Modelo de Generación de tráfico 38

Figura 4-5: Posible traza de voz 39

Figura 4-6: Posible traza de un codificador 39

Figura 4-7: Procesos ON-OFF y viceversa 40

Figura 4-8: Cadena Markov Binomial para dos tipos de tráfico. 42

Figura 4-9: Cadena Markov unidimensional para un proceso NIRP. 42

Figura 4-10: Cadena Markov para un solo proceso, N=1, IRP. 42

Figura 5-1: Parámetros de QoS 44

Figura 5-2: Modulación para distintos valores de SINR..... 45

Figura 5-3: Modelos de propagación..... 46

Figura 5-4: Tipos de celdas y sus características..... 47

Figura 5-5: Modelos de pérdidas 47

Figura 5-6: Pérdidas Longley and Rice 49

Figura 6-1: Radio de cobertura del nodo eNodo21 70

Figura 6-2: Alcance del nodo eNodo2..... 71

Figura 6-3: Parámetros del Radio Enlace 71

Figura 6-4: Enlace ascendente 73



Figura 6-5: Parámetros del enlace 73
Figura 6-6: Radioenlace establecido en sentido ascendente 74
Figura 6-7: Parámetros del radioenlace 74
Figura 6-8: Radio de cobertura en un entorno rural con población..... 75
Figura 6-9: Alcance del nodo eNodo25..... 75
Figura 6-10: Simulación del radioenlace 76
Figura 6-11: Radio de cobertura del nodo eNodo26..... 76



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros según ancho de banda del canal	16
Tabla 2 : Parámetros de entrada para el modelo Longley and Rice de Radio Mobile .	50
Tabla 3: Valores sugeridos de Δh	51
Tabla 4: Valores sugeridos de permitividad y conductividad refractividad de la superficie	51
Tabla 5: Climas y valores sugeridos para N_s	52
Tabla 6: Características de los equipos de los nodos eNB y de los UE	53
Tabla 7: Valores de RSRP calculados	58
Tabla 8: Potencia Recibida por un usuario.....	64
Tabla 9 : SINR	66



ACRÓNIMOS

A

AMC: Adaptive Modulation and Coding
ARQ: Automatic Repeat reQuest
AWS: Advanced Wireless Services
ACK/NAK: Acknowledged/Not Acknowledged
ADLS: Asymmetric digital Subscriber Line

B

BCCH: Broadcast Control Channel
BCH: Broadcast Channel
BER: Bit Error Rate

C

CDMA: Code Division Multiple Access
CN: Core Network (núcleo de red)
CS: Dominio de servicio de conmutación de circuito

D

DS-CDMA: Direct Sequence - Code Division Multiple Access
DCI: Downlink Control Information
DFT: Discrete Fourier Transform
DCR: Direct Conversion Receiver
DRX: Discontinuous Reception
DAC/RF: Digital to Analog Converter / Radio Frequency

E

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EPS: Evolved Packet System
E-UTRAN: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EPC: Evolved Packet Core

F

FDM: Frecuence Division Multiplexing
FDD: Frequency Division Duplexing
FEC: Forward Error Correition

G

GSM: Global System for Mobile communication
GPRS: General Packet Radio Service
GGSN: Getway GPRS Support Node
GW: GateWay

H

HARQ: Hybrid ARQ
HO: Handover
HSPA+: High Speed Packet Access
HSS: Home Subscriber Server

I

IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform
ITU: International Telecommunication Unit
IMT-2000: International Mobile Telecommunication-2000
IMT-DS: Direct Sequence
IMT-MC: Multicarrier
IMT-TC: Time Code
IMT-SC: Single Carrier
IMT-FT: Frecuency Time
ICI: Inter-carrier Interference
ICIC: Inter-cell Interference Control
IP: Internet Protocol

L

LTE: Long Term Evolution



M

MSC: Mobile services Switching Center

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MAC: Medium Access Control

MME: Mobility Management Entity. The key control node for the LTE access network

N

NAS: Non Access Stratum

NAT: Network Address Table

O

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

P

PAPR: Peak to Average Power Ratio

PCI: Physical Cell Identity

PDCCH: Physical Downlink Control Channel

PCRF: Policy and Charging Rules Function/The Bridgewater Policy Controller

PDCP: Packet Data Convergence Protocol

PS: Dominio de servicio de conmutación de paquete

PDN: Packet Data Network

P-GW: Packet Data Network Gateway

Q

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

QCI:QoS Class Identifier

R

RAN: Radio Access Network

RNC: Radio Network Controller. Control de la Red Radio

RNS: Radio Network System. Subsistema de red de radio

RLC: Radio Link Control

RRU: Remote Radio Unit

S

SGSN: Serving GPRS Support Node

SAE: Service Architecture Evolution, the core network for LTE

S-GW: Serving Gateway

SC-FDMA: Single Carrier-Frequency Division Multiple

T

TDD: Time Division Duplexing

TLS: Transport Layer Security

TBF: Temporary Block Flow

U

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System

UE: Equipo de Usuario

UPE: User Plan Entity

UTRAN: UMTS Terrestrial RAN

W

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access

WLAN: Wireless Local Area Network

INTRODUCCIÓN

Las Telecomunicaciones son un sector en plena evolución, especialmente la telefonía móvil cuyo desarrollo ha alcanzado los 6700 millones [2] de líneas móviles a principios de 2013.

Las economías emergentes están favoreciendo el aumento del número de abonados entorno a 75 millones cada trimestre. El tráfico de datos se está multiplicando por dos cada año.

“Para conseguir los primeros mil millones de abonados hicieron falta 20 años, sin embargo para los últimos "mil millones" solo 15 meses”.

Si comparamos el número de abonados a la telefonía móvil con el consumo de agua a nivel mundial, observaremos que el primero es notablemente mayor.

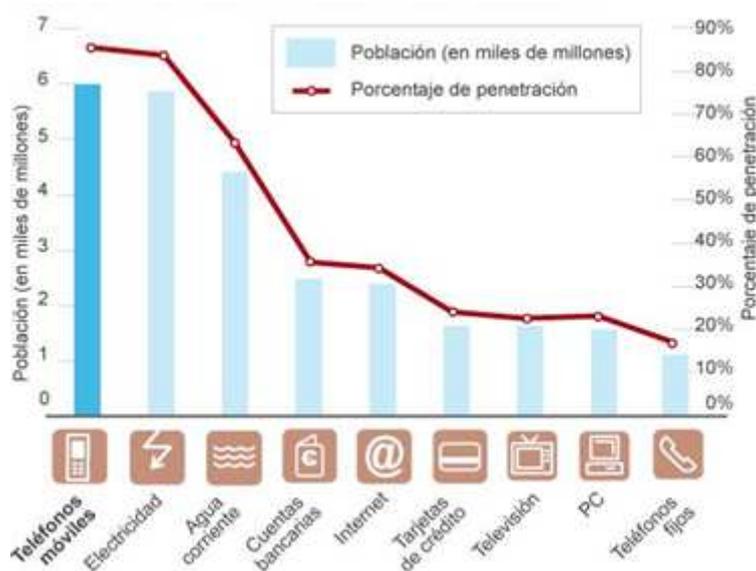


Figura1-1: Penetración de Servicios en el Mundo¹

Ante la demanda es necesario desarrollar una nueva tecnología que permita atender al creciente número de usuarios que no sólo aumenta en número sino también en demanda de servicios.

¹ <http://www.chetansharma.com>

² El nombre comercial de la red es EPS (*Evolved Packet System*) es LTE.



Como consecuencia surge una nueva tecnología, LTE² (Long Term Evolution) que introduce nuevos aspectos si lo comparamos con sistemas de comunicaciones móviles anteriores.

Estos aspectos están relacionados con la velocidad, movilidad, retardo, calidad de servicio (QoS) y con el protocolo IP que será el que de soporte de la red. LTE (Long Term Evolution) es desarrollada por 3GPP [3] y forma parte de la cuarta generación (4G) de sistemas de comunicaciones móviles.

Este proyecto surge de la aplicación de los conocimientos teóricos de LTE para lograr el despliegue de una red, sirviéndonos de una herramienta bastante utilizada para el estudio de áreas de cobertura como es Radio Mobile. Esta herramienta es utilizada por empresas como Amper y Siemens en proyectos relacionados con Seguridad y Defensa, como por ejemplo SIVE, Sistemas de Vigilancia de Presas, etc. Se centrará especialmente en el objetivo de desplegar una red LTE en un entorno rural, considerando las características del mismo.

El contenido de este proyecto está organizado en diferentes capítulos que constituyen las fases previas al despliegue así como el despliegue en sí. En los primeros capítulos se habla de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, la asignación de recursos radio y en los cuatro últimos se expone la planificación, el despliegue, las conclusiones y un presupuesto aproximado.



1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

1.1 PROPUESTA

La constante evolución de los sistemas de comunicaciones móviles camina en la dirección de lograr el despliegue de las redes LTE que forman parte de los sistemas de Cuarta Generación (4G).

En proyectos de fin de carrera anteriores se ha realizado el despliegue de estas redes en entornos urbanos, pero no en entornos rurales.

El presente proyecto surge de la propuesta de realizar la planificación y el despliegue de una red LTE en una zona rural de la comunidad de Madrid, teniendo en cuenta aspectos como la gestión del tráfico IP y la reducción de la interferencia intercelular, Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) [4].

1.2 OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto es realizar el despliegue de una red LTE que dote de cobertura a varios municipios de carácter rural en la zona sureste de Madrid.

El diseño y despliegue de esta red se realiza aplicando el modelo de pérdidas Longley and Rice, que es el más apropiado para entornos rurales y es el utilizado por la herramienta Software Radio Mobile. El flujo de datos, “throughput” [5] de esta red se obtiene mediante la herramienta LTE in Bullets.

1.3 CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN

Los criterios para llevar a cabo la planificación han sido:

- Elección de un entorno rural ligeramente accidentado.
- Ubicación de antenas en función de la densidad de población y características del entorno.
- Se elige un modelo de pérdidas en función del entorno.
- Cálculo de la potencia recibida por usuarios en diferentes localizaciones.
- Modulación en función de la SINR.
- Cálculo del “throughputs” para diferentes anchos de banda.



- Investigar y ejecutar los procedimientos básicos de planificación necesarios para crear una red LTE.
- Comparar el funcionamiento del sistema LTE cuando se habilita la ICIC y cuando se utilizan los esquemas de reuso de frecuencia: Fractional Frequency Reuse (FFR) Partial Fractional Frequency Reuse (PFFR), Soft Fractional Frequency Reuse (SFFR) y Sectorizado Fractional Frequency Reuse.
- 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.

1.4 LIMITACIONES Y ALCANCES

1.4.1 LIMITACIONES

En la fase de planificación se realizaron cálculos de pérdidas previos a los obtenidos mediante Radio Mobile, pero al tratarse de un modelo de pérdidas que tiene en cuenta las características del relieve, estos cálculos no resultan fiables. Es recomendable utilizar herramientas que proporcionen estos datos.

La simulación de la red no permite ver la potencia recibida de un nodo en cada usuario, a la vez, si no que muestra gráficamente la cobertura de cada radioenlace por separado, no se consigue tener una visión conjunta del despliegue.

El tutor propuso incluir en este proyecto una descripción de cómo se gestionaba el tráfico de voz en esta red. El tráfico de voz, al tratarse de una red cuyos datos se transmiten en paquetes IP, se trata como VoIP, investigando se han encontrado diferencias entre VoIP y VoLTE que se expondrán en el capítulo correspondiente. No se ha encontrado demasiada información al respecto por lo que no ha sido posible hacer una exposición exhaustiva.

2 EVOLUCIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES. REDES 4G.

2.1 ALCANCES

En el momento de realizar la planificación no se han considerado otros sistemas que puedan ocasionar interferencias en la zona de despliegue.

2.2 ANTECEDENTES DE LA RED LTE

El mundo de las telecomunicaciones se ha convertido en una herramienta imprescindible para la sociedad. La telefonía móvil es un claro ejemplo de ello. [6] [7]

2.2.1 0G PRECELULARES: LAS PRIMERAS REDES

Tienen su origen en EE.UU en los años 40. Eran utilizados por el gobierno y entes privados sin conexión a la red pública. El sistema Mobile Telephones System (MTS) llegó a tener 32 canales de usuarios pero era necesario la presencia de una operadora. En 1948 en EE.UU comenzó a operar el primer servicio de telefonía automático del mundo, automático en el sentido de que no necesitaba operadora.

2.2.2 1G LA ERA ANALÓGICA CELULAR

Las redes celulares surgen en la década de los 80, eran analógicas. Esta generación se caracterizó por la división del área de servicio en pequeñas celdas o células, se consigue la reutilización de frecuencias. Permiten movilidad aunque el usuario cambie de celda, handover.

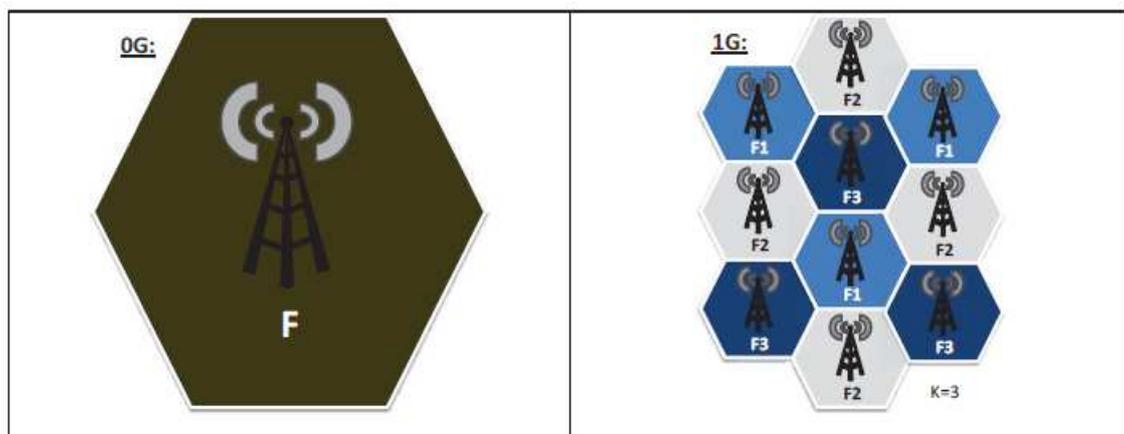


Figura 2-1 Diferencias en el reuso de frecuencias entre los sistemas pre-celulares (0G) y celulares (1G)



Un ejemplo representativo del uso de frecuencias en ambas generaciones se observa en la Figura 2-1, donde se aprecia que la frecuencia 'F' usada en los sistemas pre-celulares se divide por un valor denominado factor de reuso K (en el ejemplo de valor igual a 3), dando como resultado las frecuencias 'F1', 'F2' y 'F3', cuyo reuso permite cubrir la misma área de terreno.

2.2.3 2G POPULARIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN

En 1990 se creó el sistema Global Systema Mobile for Commnication (GSM), que funcionaba en la banda de 900MHz y combinaba las técnicas Time División Multiplexing Access (TDMA) y Frecuency Division Multiplexing Access (FDMA). Se alcanzan mejoras tecnológicas que se ven reflejadas en los terminales de usuario.

2.2.4 2,5G DATOS E INTERNET

Es una evolución a nivel de datos debido al crecimiento comercial de Internet³. Incorpora la transmisión de datos en modo paquete. Se aumenta la velocidad de transmisión de datos. En el año 2000 se utiliza la tecnología General Packet Radio Service (GPRS) que se apoya en el protocolo IP. Se pasa de la conmutación de circuitos a la conmutación de paquetes.

2.2.5 3G ESPECTRO ENSANCHADO

Los sistemas de tercera generación están enfocados principalmente a ofrecer mejoras en la comunicación multimedia, como transferencia de imágenes y videos, así como incrementar la velocidad de transmisión permitiendo la aparición de nuevos servicios y aplicaciones, al mismo tiempo que facilita el acceso a redes tanto públicas como privadas.

El 3rd Generation Partnership Project (3GPP) desarrolló el primer sistema de tercera generación conocido como Universal Mobile Telecommunications System⁵ (UMTS) para que fuera el sucesor de las Tecnologías de segunda generación basadas en GSM. La mayoría de los cambios del sistema se hicieron en la red de acceso:

- Las estaciones bases pasaron a denominarse Node-B.
- Los controladores como Radio Network Controller (RNC).
- Se mantuvieron los elementos de la Core Network de GSM con las modificaciones introducidas por GRPS y Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE).

³ El Internet se volvió comercial a mediados de 1990 con la introducción de navegadores web gráficos como el Netscape. El crecimiento de usuarios de Internet fue casi tan grande como el de los usuarios de telefonía móvil y el funcionamiento de Internet está basado en el protocolo denominado IP (Internet Protocol), que es un protocolo no orientado a conexión, usado para la comunicación de datos a través de una red de paquetes conmutados. A pesar de que el nombre formal de la red es *Evolved Packet System* (EPS), el término que ha sido adoptado comercialmente es LTE.



UMTS utiliza WCDMA (Wideband CDMA) como estándar de transmisión radio.

Asimismo UMTS introduce especificaciones que permiten modos de duplexado Frequency Division Duplexing (FDD) y Time Division Duplexing (TDD). El primero utiliza dos bandas de frecuencias, separadas entre sí, para los enlaces ascendente y descendente. En cambio en el segundo modo, ambos enlaces están separados en tiempo y ocupan una misma banda de frecuencia. Se utiliza principalmente cuando el espectro está limitado y no hay bandas pares.

2.2.6 3,5G TRANSICIÓN ACTUAL

Básicamente estas tecnologías buscan reducir el tiempo de latencia y aumentar la velocidad de transmisión generando de esta forma una mejora y crecimiento en servicios como:

- VoIP
- Videotelefonía/Videoconferencia
- Juegos 3D o Multi-jugadores
- Carga y descarga de elementos como imágenes, videos, canciones y ficheros de gran tamaño

2.2.7 4G ACTUALIDAD O FUTURO INMEDIATO

LTE. Tecnología desarrollada por 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:

- Está basado en conmutación de paquetes.
- Emplea las técnicas de acceso múltiple OFDMA para enlace descendente (downlink) y SC-FDMA para el ascendente (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 enlace descendente y enlace ascendente respectivamente.
- 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
- 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.

Los aspectos más importantes de la evolución de los sistemas hasta la actualidad se muestra en la Figura 2-2.:

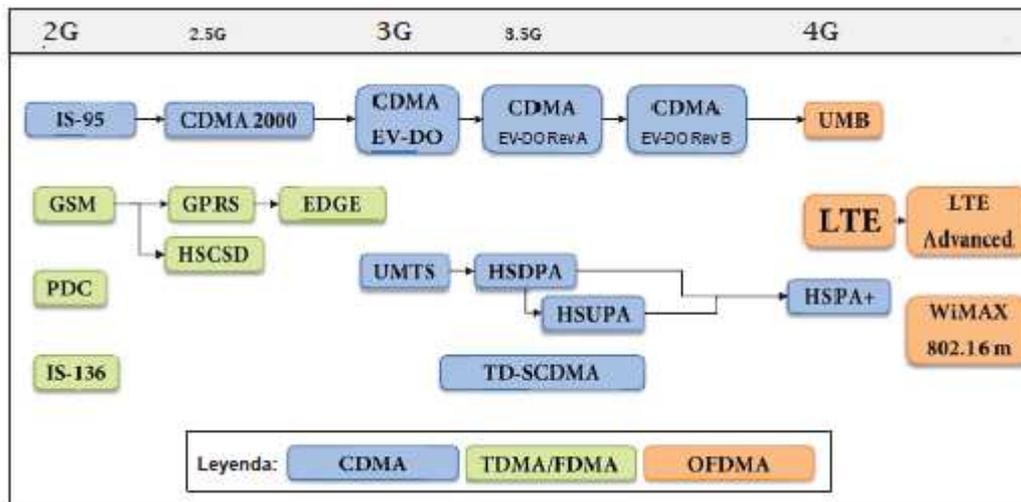


Figura 2-2: Evolución de los sistemas de telefonía Móvil

2.3 LA RED LTE (Long Term Evolution)

La evolución de la red 3G, es la red LTE, considerada como de cuarta generación. En esta evolución LTE ha heredado los aspectos más relevantes de 3G:

- Planificación (Scheduling)
- Técnicas Automatic Repeat Request (ARQ).
- Técnica Hybrid ARQ (HARQ)
- Adaptive Modulation and Coding (AMC)

Los aspectos menos notables de 3G [8] han sido la complejidad del núcleo de la red, protocolos y señalización así como el uso poco eficiente del ancho de banda. Las consecuencias de estas debilidades han sido costes elevados y latencia.

LTE emplea nuevas técnicas de modulación y multiacceso como OFDMA en el enlace descendente (DL) y SC-FDMA en el enlace ascendente (UL). Para el aprovechamiento de la propagación multirrayecto se emplea la tecnología Multiple Input Multiple output (MIMO).

La multiplexación por división de frecuencia (FDM) es un tipo de multiplexación en donde varias señales en banda base son moduladas en diferentes frecuencias de sub-portadoras que conformarán una única señal. La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) está basado en FDM y utiliza sub-portadoras ortogonales para transmitir datos, tras pasar

la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión. Es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias.

2.4 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA LTE

La arquitectura de un sistema LTE corresponde a un sistema Evolved Packet System (EPS). Están formados por tres componentes básicos como se observa en la Figura 2-3: equipo de usuario, red de Access (E-UTRAN) y red troncal.

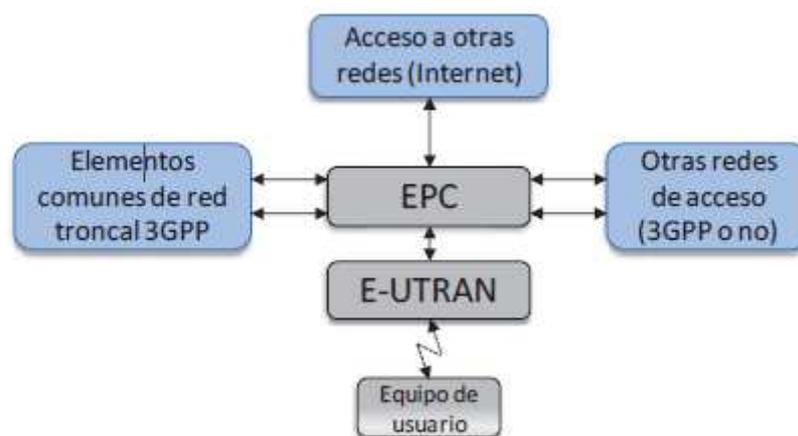


Figura 2-3: Sistema EPS

El equipo de usuario, “User Equipment” (UE) 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 “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 2-3, 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, a pesar de que esta posibilidad no esté incluida como parte del estudio de este proyecto.

En la Figura 2-4 se puede observar la arquitectura e interfaces de la red de acceso, la cual está compuesta únicamente por la estación base denominada envolved NodeB (eNodeB), a diferencia de los sistemas móviles previos, que estaban compuestos por estaciones base

y equipos controladores de estaciones base.

Los eNodoB's proporcionan la conectividad entre los equipos de usuarios UE y la red troncal EPC. Además presentan tres interfaces de nombre E-UTRAN U_{i} , S1 y X2 que les permiten comunicarse con el resto de elementos del sistema. La Figura 2-4 muestra un esquema con los interfaces mencionados.

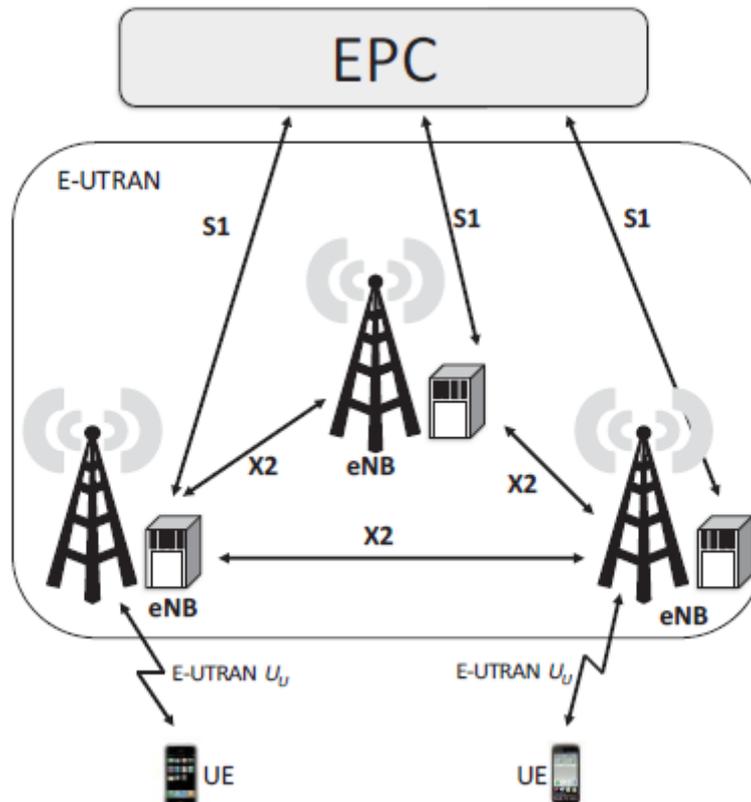


Figura 2-4: Red de acceso EUTRAN e interfaces

La primera interfaz es la E-UTRAN U_{i} [9] también conocido como interfaz radio LTE. Este interfaz permite la transferencia de información a través del canal radio en los eNodoBs 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 eNodoB. [14]. La transferencia de paquetes IP entre un eNodoB 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 eNodoB 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 eNodoBs 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 eNodoBs además de realizar funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, asignación dinámica de recursos radio, tanto en el enlace descendente como el enlace ascendente (conocida como funciones de asignación, “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 éstos realicen un handover, o también mensajes de señalización con el objetivo de reducir la interferencia entre eNodoBs.

Por último existe la interfaz denominada S1 que conecta los eNodoBs con la red troncal EPC, dicha interfaz está formada a su vez por dos interfaces más de nombre S-GW (Gateway) y SMME (Mobile Management Entity) asociadas al plano de control y al plano de usuario respectivamente. Las Figuras 2-5 y 2-6 muestran la pila de protocolos de cada elemento de la red [10].

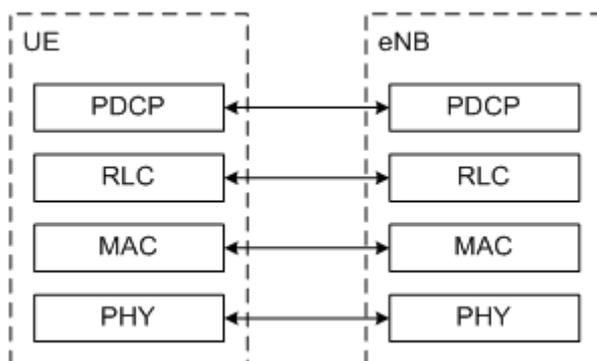


Figura 2-5: Pila de protocolos de usuario

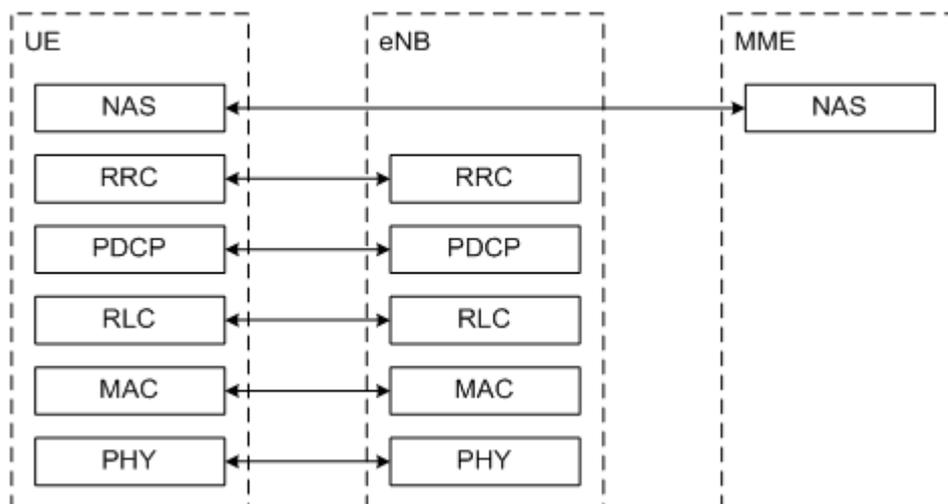


Figura 2-6: Pila de protocolos

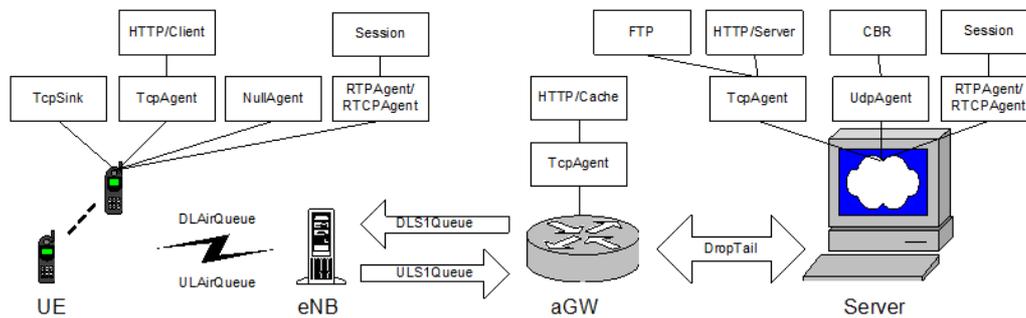


Figura 2-7: Modelo de Red LTE

Mediante la Figura 2-7 se resumen el funcionamiento de una red LTE. La interfaz S1 conecta a las estaciones con base con la red troncal. Se ha mencionado anteriormente que esta interfaz está formada a su vez por otras dos, mediante una de ellas accede a GW.

2.5 MODULACIONES LTE – TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO

LTE implementa a nivel físico una tecnología que permite utilizar de forma más eficiente los recursos radio disponibles si lo comparamos con sistemas anteriores. LTE utiliza las técnicas de acceso múltiple OFDMA y SC-FDMA para los enlaces descendente y ascendente respectivamente, ambas basadas en la técnica de transmisión OFDM.

Una transmisión de portadora única “*Single Carrier*” (SC) se traduce en que toda la información está modulada y contenida en una sola portadora (ver Figura 2-8), que ocupa una banda de frecuencia definida como se muestra en la Figura 2-8 cuyas características como fase, frecuencia y amplitud pueden ser ajustadas por un transmisor que tenga las capacidades adecuadas.

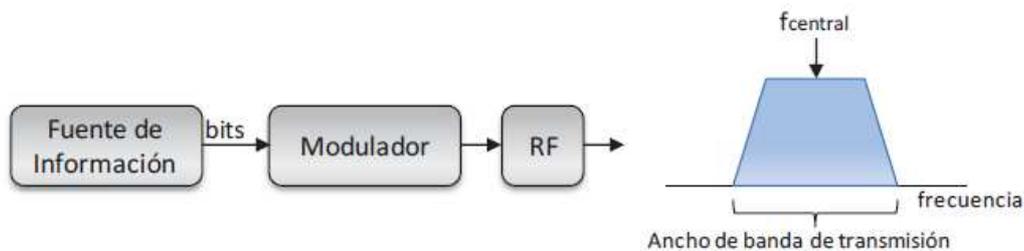


Figura 2-8: Transmisor de portadora única.

En el concepto de FDMA, cada usuario utiliza una frecuencia portadora o subportadora

distinta como se muestra en la Figura 2-9. 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, pero que tampoco estén demasiado separadas ya que se estaría haciendo un mal uso del espectro.

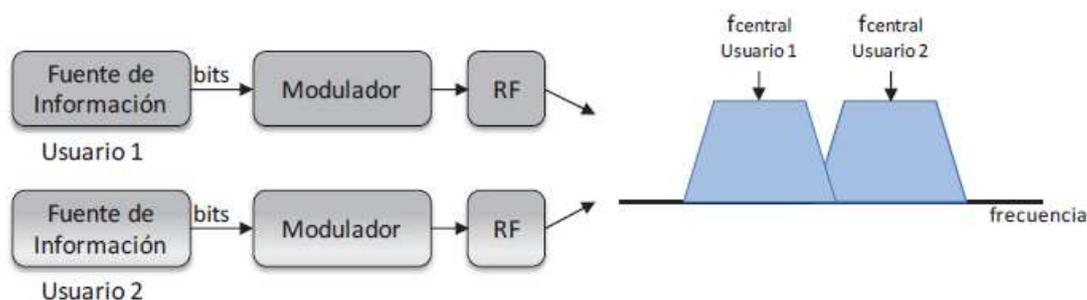


Figura 2-9: Transmisor basado en concepto FDMA.

El concepto de señal multi-portadora se muestra en la Figura 2-10 que se muestra a continuación. Los bits de información son repartidos sobre las distintas subportadoras de un mismo transmisor utilizando un banco de filtros⁴ y con igual separación entre subportadoras.

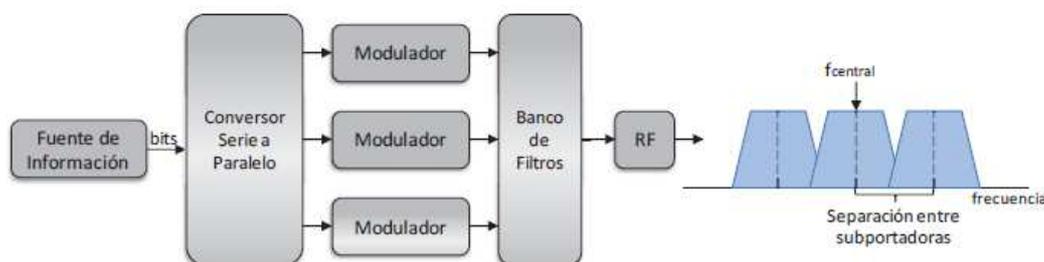


Figura 2-10: transmisor basado en concepto de Multiportadora.

La técnica de transmisión OFDM constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora basado en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí. Las propiedades de ortogonalidad permiten, a pesar de que los espectros de las subportadoras estén superpuestos, que no sea un impedimento para la separación en recepción y posterior recuperación de los símbolos transmitidos.

En la Figura 2-11 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.

⁴ En la práctica cuando el número de subportadoras es alto se utiliza la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT).

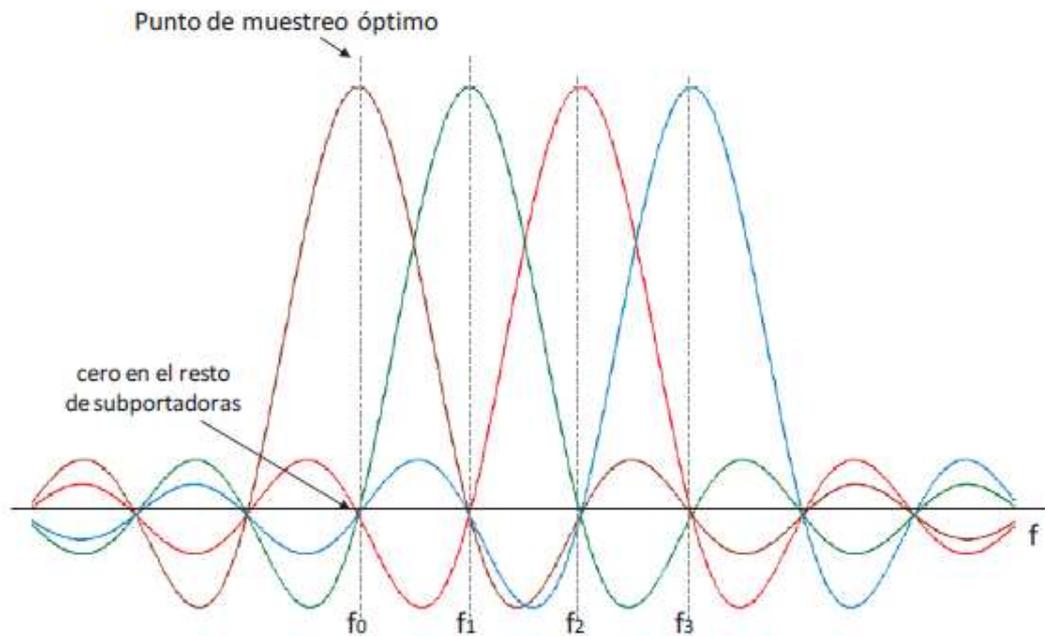


Figura 2-11: Espectro correspondiente a 4 subportadoras OFDM

2.5.1 MODULACIÓN Y TÉCNICA DE ACCESO AL MEDIO SIMULTÁNEA (OFDMA)

Las sub-portadoras son asignadas dinámicamente a usuarios en diferentes intervalos de tiempo, "time-slots". Permite a un usuario transmitir y recibir en una trama de tiempo entera, pero reduce el Peak to Average Power Ratio (PAPR), distribuyendo el ancho de banda total a varias estaciones móviles usando poca potencia de transmisión.

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 Inverse Fast Fourier Transform (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 para evitar las consecuencias de fenómenos como la difracción, reflexiones, etc. Por último se convierte la señal a analógica y se transmite por el canal radio. Este proceso está reflejado en la Figura 2-12.

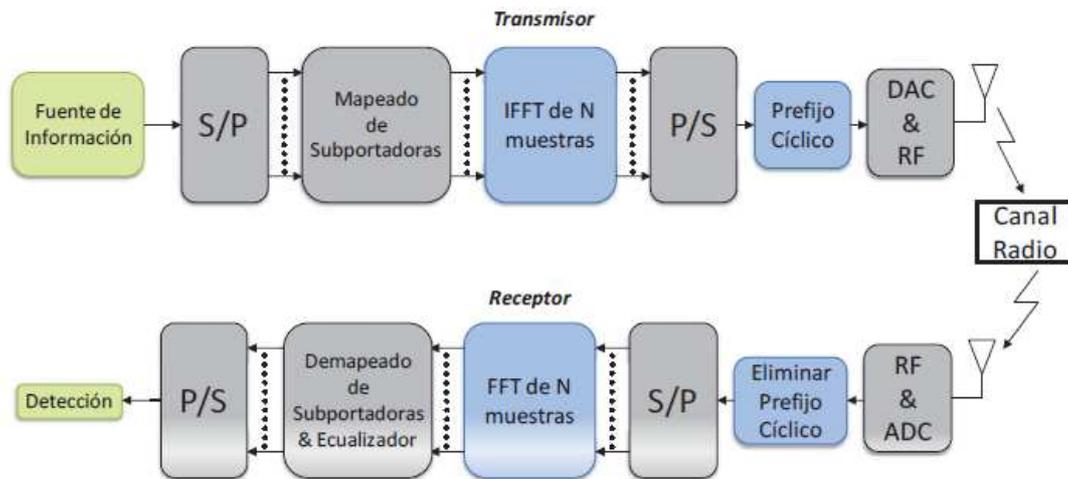


Figura 2-12: Transmisor y Receptor OFDMA

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 2-13.

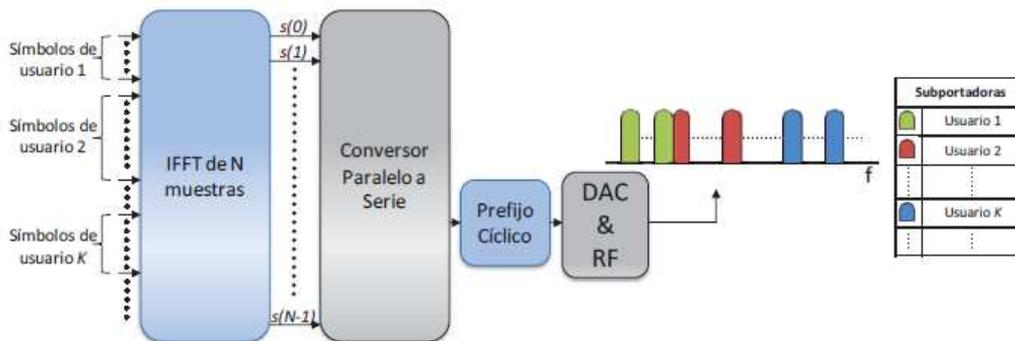


Figura 2-13: Multiplexación de usuarios en OFDMA

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

La separación entre subportadoras es de $\Delta f=15\text{kHz}$, aunque también existe una posibilidad de que sea $7,5\text{kHz}$ pero enfocado a transmisiones *multicast* en redes isofrecuenciales ,”Single Frequency Network” (SFN).

Las subportadoras se agrupan 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 enlace descendente es $N_s=12RB+1$, es decir, la suma del número de bloques de 12 subportadoras (RB) 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 RB 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 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 $f_m = N \cdot \Delta f$.

En la Tabla 1 se muestra la tabla con las distintas frecuencias de LTE y sus características:

$BW_{Canal}(MHz)$	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 1: Parámetros según ancho de banda del canal

En el enlace descendente se pueden emplear las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM.

2.5.2 MODULACIÓN SC-FDMA

SC-FDMA es también una extensión de OFDM. Es una técnica de modulación híbrida que combina las ventajas de OFDMA como la elección de subportadoras y la robustez frente a la propagación multicamino con una relación potencia instantánea - potencia media menor en comparación a la del sistema OFDMA.

Esta técnica reduce el PAPR de manera significativa en comparación con OFDMA, transmitiendo en subportadoras en secuencia y no en paralelo, como en OFDMA.

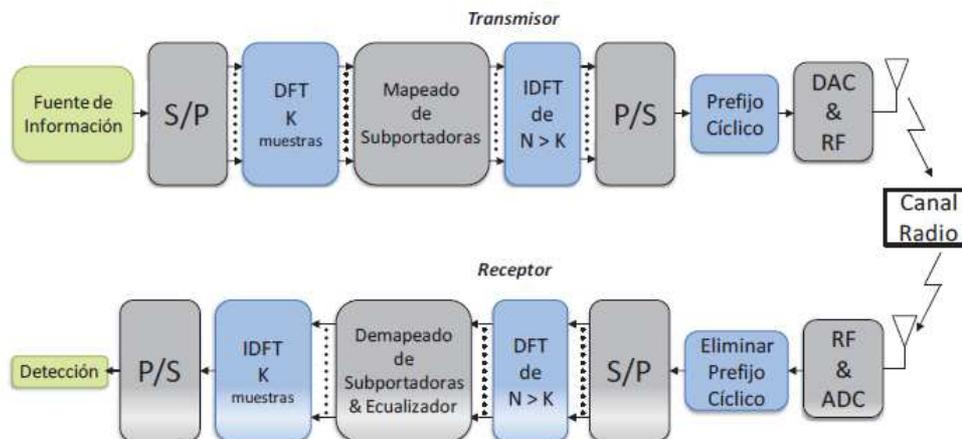


Figura 2-14: Transmisor y Receptor SC-FD

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.

El mecanismo de multiplexación de las transmisiones de diferentes usuarios se puede observar en la Figura 2-15, 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 $K \text{ usuarios} * \Delta f$.

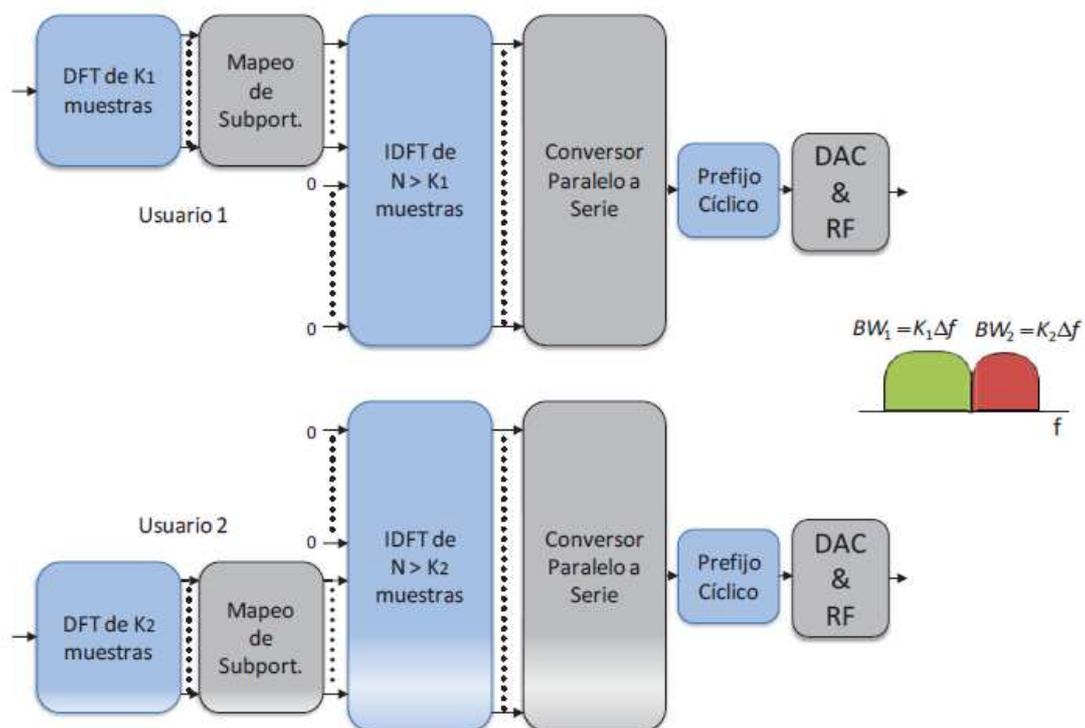


Figura 2-15: Multiplexación de usuarios con SCFDMA

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 (Figura 2-16) 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 $N_s=12RB$ 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 enlace descendente. Las modulaciones en el enlace ascendente pueden ser QPSK, 16QAM y 64QAM.

2.5.3 MIMO

El estándar LTE implementa la técnica de múltiples antenas en recepción y transmisión denominada MIMO 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.

La modulación elegida por el estándar 3GPP hace que las diferentes tecnologías de antenas (MIMO) tengan una mayor facilidad de implementación; esto favorece, según el medio, hasta cuatro veces la capacidad de transmisión de datos.

El detonante para que el 3GPP comenzase a trabajar en el desarrollo de LTE fue reconocer la necesidad de dar respuesta a la demanda en banda ancha móvil, mejorando el servicio prestado hasta el momento y reduciendo el coste por bit.

2.5.4 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 eNodoB's. Cada eNodoB 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.

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.

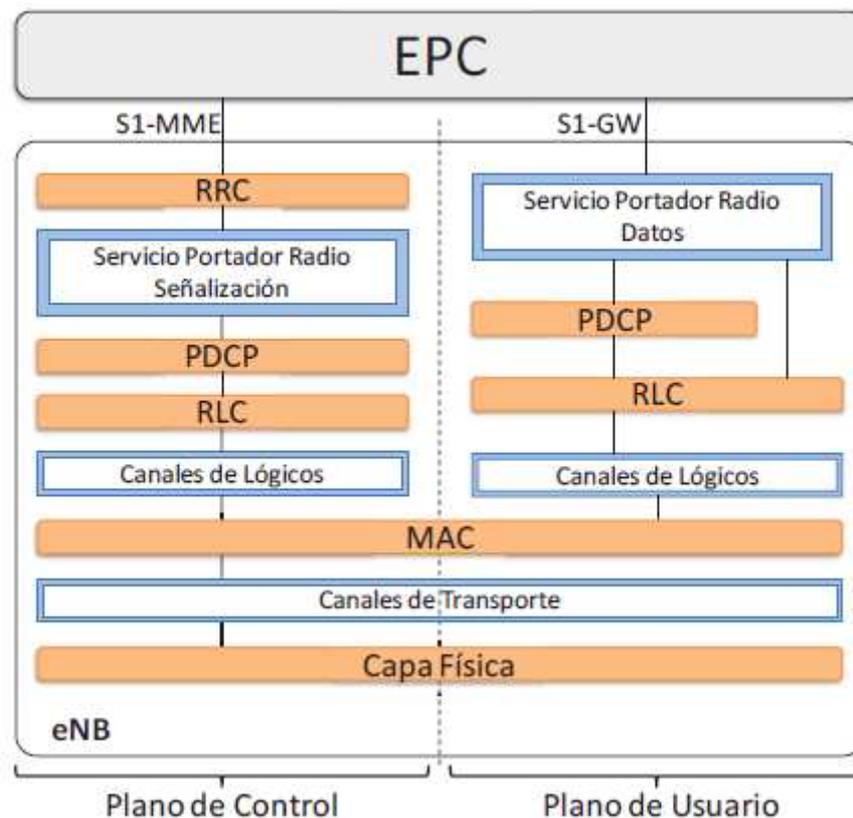


Figura 2-16: Protocolos de la Interfaz aire del sistema LTE

En el plano de usuario, como se puede observar en la Figura 2-16, 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 QoS que ha de ser garantizado por la torre de protocolos.

Los protocolos utilizados por ambos planos en el interfaz aire son los siguientes:

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

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

2.5.4.1 CAPA FÍSICA

La capa física opera en bandas altas de Ultra High Frequency (UHF), por encima de los 450MHz y hasta los 3,5GHz.

A nivel de capa física se define el concepto de bloque de recursos físicos Physical Resource Block (RB), como el mínimo elemento de información que puede ser asignado a un terminal móvil. Un RB 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 RB dura 0.5ms correspondiente a la duración de un slot dentro de una trama LTE. La Figura 2-18 que se muestra a continuación es la representación gráfica de un RB en una señal OFDMA. Cada color representa a un usuario y la asignación de RBs es variable con el tiempo.

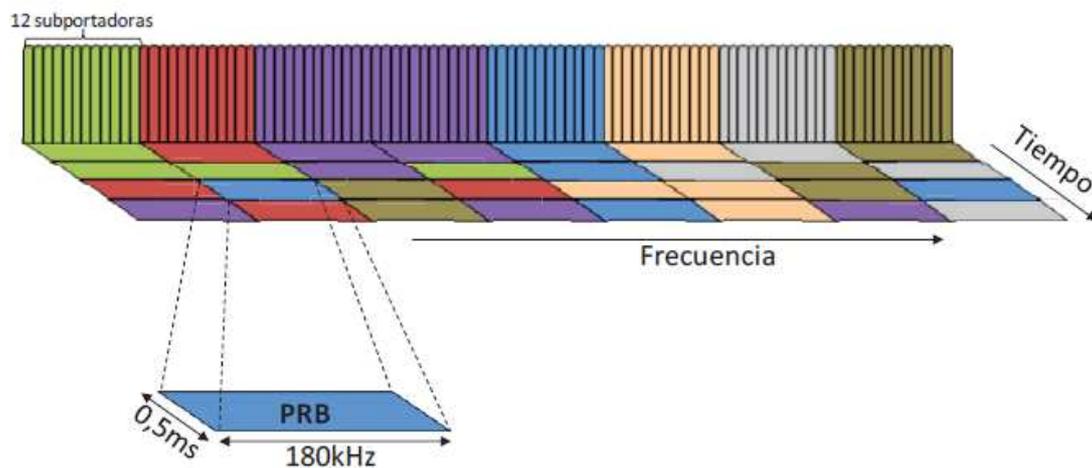


Figura 2-17: RB en trama OFDMA

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.

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 66.7µs. El prefijo cíclico (CP) a utilizar depende del número de símbolos por subtrama, en caso de 7 símbolos el CP dura 4.7µs excepto para el primer símbolo que dura 5.2µs y se le define como prefijo cíclico normal. En cambio, para el caso de que se utilicen 6 símbolos, el CP tiene una longitud de 16.67µs 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 eNodoB y denominado scheduler, en una estructura de frecuencia-tiempo definida como Scheduling Resource Block (SRB), formada por dos RB, es decir, que tienen 180KHz de ancho y un intervalo de tiempo de duración igual a una subtrama (1ms) de largo. Dicha duración corresponde con la mínima granularidad temporal en la asignación de recursos que es igual a 1ms. La duración de la trama se puede ver gráficamente en la Figura 2-19.

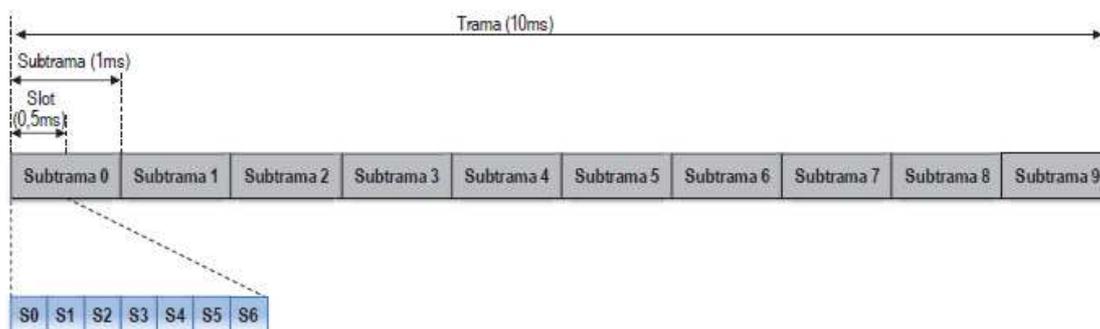


Figura 2-18: Duración de la trama

2.5.4.2 SEÑALES Y CANALES FÍSICOS EN LOS ENLACES ASCENDENTE Y DESCENDENTE

2.5.4.2.1 ENLACE DESCENDENTE

Las señales físicas en LTE juegan un papel importante para facilitar la demodulación.

A continuación se habla de dos tipos de señales:

Señales de referencia (RS): se utilizan para realizar medidas sobre la calidad del enlace descendente, búsqueda de celdas y sincronización. Hay dos tipos las señales de referencia primarias y las secundarias, RSP y RSS respectivamente⁵.

Señales de Sincronización (SCH): facilitan la sincronización temporal. Están formadas por dos señales, una primaria que sincroniza a nivel de trama y una secundaria que sincroniza a nivel de subtrama.

En las especificaciones de LTE están definidas 504 secuencias de señales de referencia obtenidas a partir de secuencias Gold (secuencia binaria con buena correlación) de longitud 31. Estas 504 secuencias se agrupan en 168 grupos de 3 secuencias cada uno. Cada grupo

⁵ 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.

identifica a una estación base distinta eNodoB. Con las tres secuencias de cada grupo se identifica a uno de los tres posibles sectores de una eNodoB

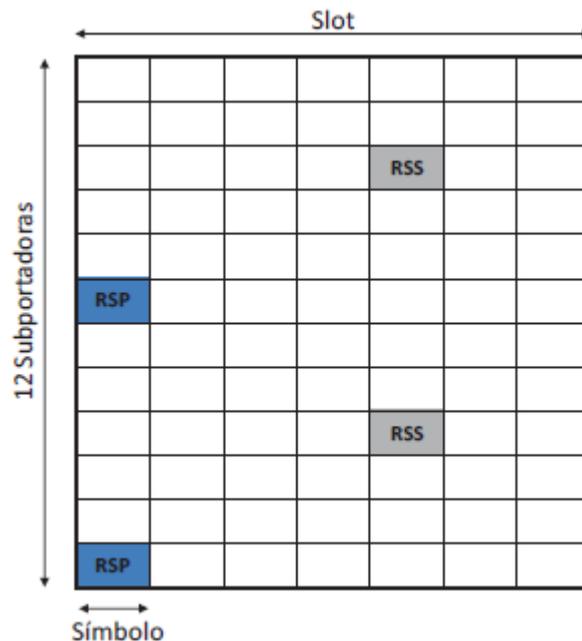


Figura 2-19 :Señales de referencia en un RB

En la Figura 2-20 se observan canales de tráfico y de control. Los canales físicos pueden ser de tráfico y de control. Los canales de tráfico en LTE son compartidos, nunca dedicados.

Physical Downlink Shared Channel (PDSCH): Canal de tráfico que transmite información del usuario. No es un canal dedicado por lo que se asigna a un usuario cuando este tiene algo que recibir en función de la asignación de recursos del scheduling del enlace descendente. Utiliza modulación QPSK, 16QAM, 64QAM y turbo códigos con tas 1/3 para la codificación del canal. Para la retransmisión 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.

2.5.4.2.2 ENLACE ASCENDENTE

En el enlace ascendente existen dos tipos de señales de referencia:

Demodulation Reference Signal (DM-RS): es una señal utilizada para la estimación de la respuesta al impulso del canal. Son necesarias para permitir la demodulación coherente en el enlace ascendente. Si está asociada a la transmisión de datos se ubica en el cuarto símbolo



de SC-FDMA, ocupando tantas subportadoras como los datos de usuario. Si está asociada a control, su ubicación no es fija y depende del formato utilizado.

Sounding Reference Signals (SRS): es una señal de referencia destinada al sondeo de la calidad del canal de transmisión. Se utiliza para facilitar la toma de decisión de los algoritmos de scheduling.

Los canales físicos del enlace ascendente son:

Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): canal utilizado para transmitir la información del usuario. El número de subtramas y la cantidad de subportadoras disponibles para cada usuario dependerá de la asignación realizada por el scheduler que se encuentra en la eNodeB. Emplea esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM⁶, así como turbocódigos de tasa 1/3 para la codificación del canal y mecanismos de retrasmisión híbrida (HARQ).

Physical Uplink Control Channel (PUCCH): canal utilizado para realizar peticiones de asignación de recursos, enviar tramas de asentimiento o negación como ACK y NACK para la retrasmisión híbrida. Se utiliza para transmitir información acerca de la calidad del canal, **Channel Quality Indicator (CQI)**, para optimizar la asignación de recursos en el enlace descendente.

2.6 REQUISITOS DEFINIDOS POR LA ITU PARA LTE

2.6.1 TASA BINARIA DE PICO

El sistema debe tener una tasa binaria objetivo en DL de 1 Gbps y una tasa binaria de pico en UL de 500 Mbps en caso de utilizar antenas 4x4.

2.6.2 LATENCIA

Plano de control: el objetivo de tiempo de transición desde modo idle (con dirección IP asignada) a modo conectado debe ser menos de 50 ms, incluyendo el establecimiento del plano de usuario (excluyendo el retardo de transferencia del interfaz S1). El objetivo para la transición desde un estado dormido a un modo conectado, Discontinuous Reception (DRX), es decir, substrato de recepción discontinuo en modo conectado, debe ser menos de 10 ms (excluyendo el retardo de DRX).

⁶ Para emplear 64 QAM el terminal del usuario ha de ser de categoría 5.



Plano de usuario: Tiempo tránsito unidireccional entre el instante en que un paquete está disponible en la capa IP del nodo equipo de usuario (UE) y el instante en que lo está en el nodo frontera. La latencia será inferior a 5 ms en condición descargada: un único usuario y un solo flujo de datos, para un paquete IP mínimo: Cabecera IP + carga útil de 0 bytes.

2.6.3 EFICIENCIA ESPECTRAL

LTE tiene como objetivo soportar en el canal descendente, con una configuración de antena 8x8, una eficiencia espectral de pico de 30 bps/Hz y en ascendente, configuración de antena 4x4, una eficiencia espectral de pico de 15 bps/Hz. Adicionalmente se han fijado objetivos de eficiencia espectral media, esta eficiencia espectral media se define como la agregación del “throughput” de todos los usuarios (el número de bits recibidos correctamente en un periodo concreto de tiempo) normalizado por el ancho de banda de las celdas dividido por el número de celdas.

2.6.4 “THROUGHPUT” DE USUARIO EN EL BORDE DE LA CÉLULA

LTE debe permitir que el flujo de datos, de usuario en el borde de la célula sea el más alto posible. El “throughput” de usuario en el borde de la célula se define como el punto del 5% de la función acumulativa de distribución del “throughput” de usuario normalizado por el ancho de banda total de la célula. Permite una velocidad de 20Mbps para UL y 100Mbps para DL que se corresponderían con el 100%.

2.6.5 MOVILIDAD

El sistema debe soportar movilidad a lo largo de la red celular para velocidades hasta 350 km/h (o hasta 500 Km/h dependiendo de la banda de frecuencia). Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), está optimizada para velocidades de vehículos reducidas, de 0-15km/h, con buena calidad, entre 15 y 120 km/h.

2.6.6 COBERTURA

Los objetivos básicos deben alcanzarse en células de hasta 5km de radio con ligera degradación, hasta 30km de radio.

2.6.7 FLEXIBILIDAD ESPECTRAL

Las bandas de frecuencia identificadas aparte de las ya fijadas en LTE release 8 son las siguientes:



- Banda 450-470 MHz
- Banda 698-862 MHz
- Banda 790-862 MHz
- Banda 2,3-2,4 GHz
- Banda 3,4-4,2 GHz
- Banda 4,4-4,99 GHz

LTE puede operar en espectros de diferentes tamaños, incluyendo espacios espectrales más grandes que aquellos definidos en LTE release 8. El principal objetivo para soluciones más anchas que 20 MHz debe ser en espectro consecutivo. Aun así, la agregación de espectro para LTE debe tener en cuenta una complejidad de UE razonable. Se debe soportar tanto Frequency Division Duplexing (FDD) como Time Division Duplexing (TDD) para bandas emparejadas y sin emparejar, respectivamente.

2.7 MEJORAS EN EL RENDIMIENTO DE LAS REDES LTE

Un equipo de investigadores del MIT [11], Caltech, Harvard, y otras universidades Europeas, han ideado una forma de potenciar el rendimiento en redes inalámbricas sin aumentar la potencia de transmisión o añadir más estaciones base. La creación de los investigadores, coded TCP⁷, en lugar de enviar paquetes simples, crea una ecuación que describe una serie de paquetes. Es una forma nueva de transmitir datos de modo que los paquetes perdidos no aumenten la latencia o re-envíen datos, ya que son la causa de que la red se congestione.

Un solo paquete perdido causa un aumento en la latencia. El receptor tiene que solicitar de nuevo el paquete, y no puede hacer nada hasta que lo recibe. Si hay una cantidad significativa de paquetes perdidos, resulta en un aumento considerable de la latencia, mucho re-envío de datos, y poco ancho de banda.

En coded TCP [12], se agrupan bloques de paquetes y se transforman en ecuaciones algebraicas, que describen los paquetes. Cuando se pierde una parte del mensaje, el receptor resuelve la ecuación para obtener los datos perdidos en lugar de solicitarlos al emisor. La resolución de la ecuación es simple y lineal, por lo que no requiere demasiado procesamiento por parte del router/smartphone/laptop. En las pruebas, coded TCP produjo mejoras notables. El MIT descubrió que la red WiFi del campus (con un 2% de paquetes perdidos), ascendió de 1Mbps a 16Mbps. En un tren de alta velocidad (con una pérdida de paquetes del 5%), la velocidad de conexión aumentó de 0.5Mbps a 13.5Mbps.

En realidad, estas mejoras no son del todo sorprendentes. El protocolo TCP fue diseñado para redes cableadas, donde la pérdida de paquetes es generalmente un signo de congestión.

⁷Protocolo de transporte fiable utilizando la red.



Las redes inalámbricas necesitan algún método para la corrección de errores en la recepción Forward Error Correction (FEC), y eso es exactamente lo que Codec TCP proporciona.

En un futuro, se espera que el protocolo TCP codificado tenga una gran repercusión en el rendimiento de redes WIFI y LTE.



3 GESTIÓN DE RECURSOS DE LA RED

3.1 FUNCIONAMIENTO DE LA RED MOVIL

Uno de los aspectos más importantes para los operadores de cualquier sistema de comunicaciones móviles es la gestión de recursos radio y del espectro radio eléctrico. La gestión eficiente de los recursos permite ofrecer cierta QoS.

En las redes LTE la parte encargada de estas funciones se llama Radio Resource Management (RRM).

Es muy importante resaltar que en el estándar LTE están definidas una serie de funciones y conceptos de gestión de recursos, especificando qué interfaces y qué tipo de señales realizan determinadas funciones pero no se especifican algoritmos para llevar a cabo la implementación, quedando así a decisión de los proveedores del servicio la elección de qué estrategias se implementan. Esta característica tiene un aspecto muy positivo porque los algoritmos se escogerán en función del nivel de adaptación a cada red.

Entre las funciones más relevantes de la Gestión de Recursos Radio destacan:

- **Control de Admisión Radio (RAC):** se encarga de decidir si una nueva petición de servicio para un usuario es aceptada o no.
- **Control de Servicios Portadores Radio (RBC):** se encarga de establecer el RB correspondiente a un servicio basándose en los requerimientos de QoS una vez que haya sido aceptado por el RAC. Además mantiene la QoS del servicio a lo largo de la sesión y la liberación de RB's.
- **Scheduling de Paquetes y Estrategias:** esta función es de las más importantes. Se realiza en el eNB tanto para el enlace ascendente como para el descendente. Su función consiste en asignar los recursos radio de forma dinámica, indicando qué usuarios van a transmitir, qué recursos de la interfaz radio van a utilizar y qué esquema de modulación van a emplear. El recurso mínimo que se asigna a un usuario son 2RB's de 180KHz cada uno, en una subtrama de 1ms. El canal se puede asignar en cada subtrama al usuario que presente mejor calidad de canal, aprovechándose así mejor los recursos radio.

La Figura 3-1 muestra que la asignación de recursos a un usuario depende de cómo éste perciba el canal:

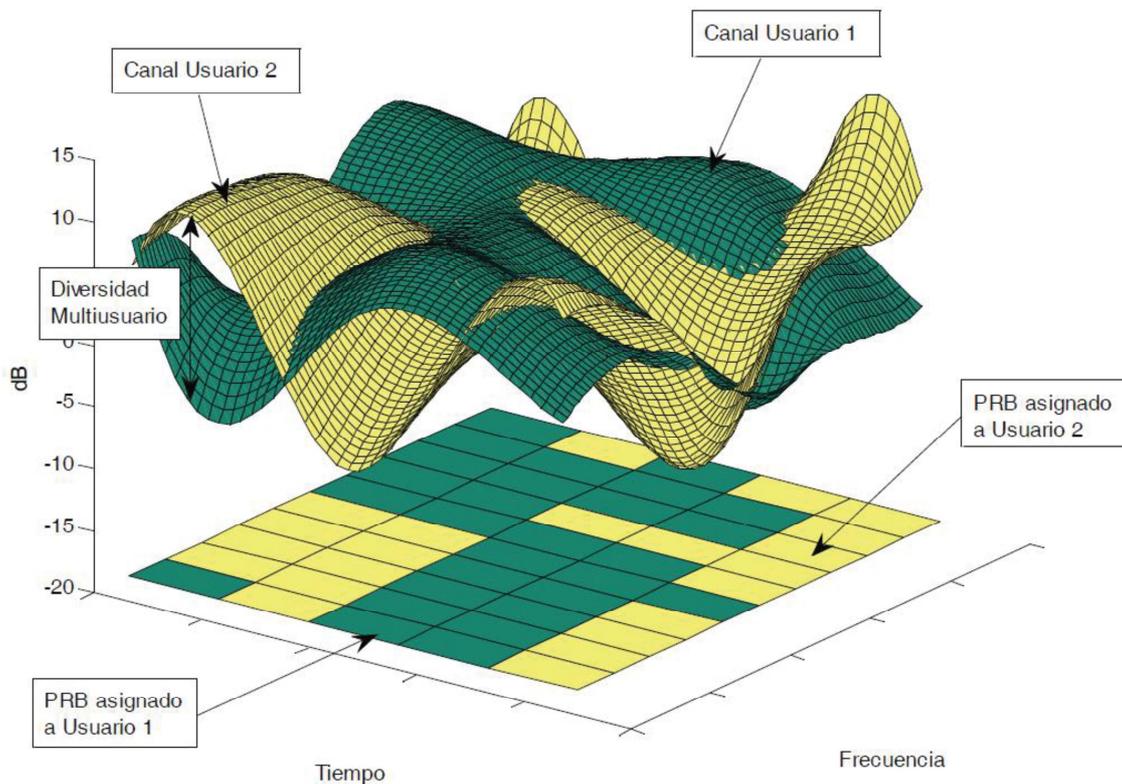


Figura 3-1 : Asignación de recursos utilizando diversidad multiusuario

Se vuelve a mencionar porque resulta de especial interés que las **estrategias** sobre los criterios que debe seguir el scheduler para decidir qué usuarios transmiten y que recursos se asignan a cada uno **NO están definidas** por el estándar.

Dos de estas estrategias son:

- **Round Robin (RR):** asigna el canal a los usuarios de forma equitativa sin tener en cuenta la calidad de canal percibida por ellos.
- **Proportional Fair (PF):** se obtiene la máxima capacidad del canal mientras se hace un reparto justo de los recursos entre los usuarios. Asigna a cada usuario un nivel de prioridad inversamente proporcional al que sería su consumo de recursos en caso de que sea elegido.



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 qué RBs 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 RB 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 lo tanto de menor eficiencia espectral, reduciendo así la cantidad de bits por RB.
- **Reducción de la duración de la batería del terminal** dada la necesidad de aumentar la potencia de transmisión en el enlace ascendente para lograr la correcta comunicación.
- **Reducción de las capacidades de la celda**, dado el incremento de mensajes de señalización debido a retransmisiones HARQ.

La **ICIC** es una estrategia de gestión de interferencias [13], 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 RB 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 interferencia 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 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 interferencias⁸ de forma estática por lo que a continuación se describen las distintas posibilidades que existen de este tipo de gestión.

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), X2application protocol (X2AP)".

En la Figura 3-2 se puede observar los posibles esquemas de reuso de frecuencias:

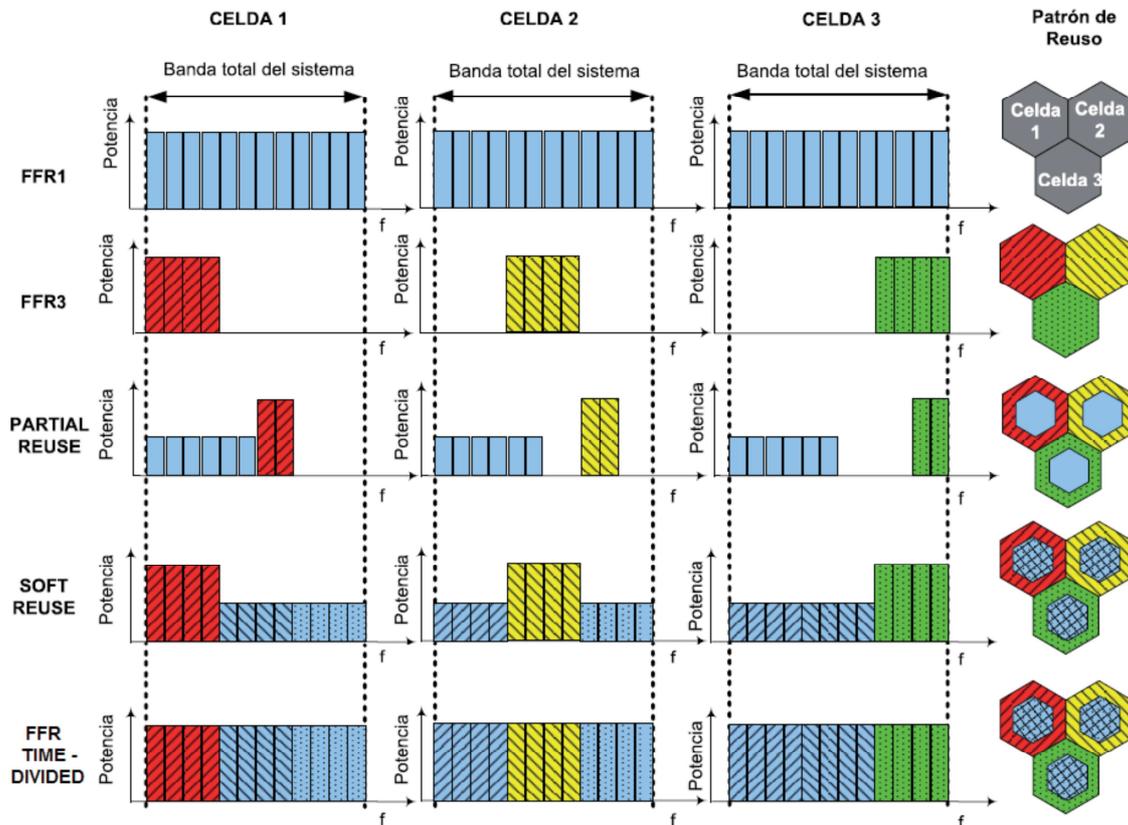


Figura 3-2: ICI

Inicialmente se ilustra el **Fractional Frequency Reuse 1 (FFR1)**, donde todos los RBs están disponibles para todas las celdas. Posteriormente se observa el caso de reuso 3 (**FFR3**)⁹, donde los RBs 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 **flujo** 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

⁹ Planificación de frecuencia lograda utilizando los 3 canales



en intervalos de tiempo distintos, pero no utiliza un nivel de potencia superior al de centro de celda.

3.2 PLANIFICACIÓN DE RADIO FRECUENCIA DE LA RED LTE

El objetivo de realizar la planificación de un sistema de comunicaciones es elegir emplazamientos adecuados y la correcta asignación de frecuencias para proporcionar la QoS esperada por los usuarios.

La ubicación seleccionada requiere de un determinado nivel de potencia de la señal y el número de usuarios requiere una capacidad determinada. Cobertura y Capacidad en LTE son indirectamente proporcionales, hay que sacrificar la capacidad para lograr buena cobertura y viceversa.

La planificación se realiza en 4 fases como se podrá observar a lo largo de este proyecto:

1. Fase 1: Balance de Potencias Inicial
2. Fase 2: Simulaciones del entorno
3. Fase 3: Puesta a punto y Optimización
4. Fase 4 : Optimización Post-despliegue



4 TRÁFICO

4.1 GESTIÓN DE TRÁFICO LTE – TRÁFICO IP

Internet es un compendio de sistemas específicos para comunicaciones, es muy heterogéneo, existen enlaces por cables, inalámbricos, tecnologías cable inalámbricas [14]. Se puede considerar como una red de sistemas autónomos (SA) interrelacionados [15]. El tráfico tiene un comportamiento homogéneo y sólo se diferencia de forma cuantitativa.

Al hablar de tráfico en internet tenemos que tener presente el concepto de autosimilaridad [16], es decir, el tráfico correspondiente a un determinado enlace se comporta de forma idéntica respecto a la escala temporal en que es observado. La autocorrelación decae de forma temporal en periodos de tiempo amplios.

Internet está formado por un conjunto de estructuras y capas que ofrecen servicios y funciones unas a otras. Estas capas pueden ser de naturalezas muy distintas pero IP establece el nexo común para la interconexión de sistemas heterogéneos estableciendo mecanismos de interconexión a nivel local como global.

Los datagramas IP son las unidades básicas de datos en internet. Dependen de las capas superiores (Transporte y Aplicación). Sigue un patrón de tráfico a ráfagas de ancho proporcional al tamaño medio de los bloques.

La capa de aplicación establece sesiones que pueden ser caracterizadas por tiempo entre llegadas, duración y tamaño en bytes.

El tráfico [17] es considerado como una agregación de paquetes IP generados extremo a extremo.

Los datos que maneja LTE son datos IP, lo que significa el servicio de voz tradicional ahora es VoIP. La convergencia de diferentes arquitecturas en el modelo IP Multimedia System (IMS) recibe el nombre de Fixed Mobile Convergence (FMC).

En VoIP la llamada se envía en forma de paquetes IP, todos los paquetes viajan por el mismo canal de manera que se aprovecha mejor el medio. Para que se lleva a cabo la comunicación hay que garantizar unos parámetros de calidad.

La gestión del tráfico incorpora un mecanismo conocido como Policy and Charging Control (PCC) que se ha convertido en un referente de las especificaciones de New Generation



Network. Esta arquitectura proporciona de forma dinámica hasta 9 QoS Class Identifier (QCI) con diferentes parámetros de ancho de banda, latencia, jitter y tasa de error PER. La asignación de QCI se aplica también a servicios como VoD, IPTV, streaming,.....

El control y la administración de la asignación se hace desde el núcleo de red y se separa el plano de datos del plano de control ya que viajarán por distintos caminos.

Hay dos elementos fundamentales:

PCFR: Su función se realiza en el plano de control y proporciona la información necesaria a aplicar en función de unas reglas previa identificación del tipo de tráfico o previa petición de QoS de una aplicación concreta.

Policy and Charging Enforcement Function (**PCEF**): Entidad situada en el plano de datos encargada de la aplicación de PCFR. Al estar situada en el plano de datos es el punto idóneo para llevar a cabo Deep Packet Inspection(DPI) para así identificar el tipo de tráfico. Se suele conectar junto al PGW que es dónde la red móvil se conecta a redes IP como internet.

4.2 TRÁFICO VoIP vs VoLTE

El despliegue de la red LTE lleva consigo el despliegue de la voz sobre LTE, VoLTE. LTE es una tecnología sólo de datos. Algunas de las redes implementadas ofrecen "carrier grade", voz digitalizada directamente. "Carrier grade" es un término que se utiliza en redes de comunicaciones para expresar una disponibilidad de las mismas del 99,999%, también llamada "five nines". VoLTE es VoIP, pero hay mucho más que eso.

La diferencia fundamental entre VoIP y VoLTE es que VoLTE requiere un componente QoS. Por lo general, las aplicaciones de VoIP como Skype y Google Voice dependen de Internet para entregar los paquetes. En la transmisión por Internet se hace el "mejor esfuerzo", todo lo que podemos hacer para entregar los paquetes a la nube.

VoLTE, por otro lado, utiliza el Subsistema Multimedia IP (IMS) y técnicas de acceso a la red radio para asegurar una latencia baja, corrección de errores, y otras características que garantizan el servicio de voz. Si toda la tecnología funciona como está previsto, la calidad de las llamadas que vamos a estar haciendo en un futuro no muy lejano será elevada, así como los nuevos servicios que están incluidos en el VoLTE.



4.2.1 ¿CÓMO SE CURSAN LAS LLAMADAS?

LTE - Advanced es aceptada por la ITU en 2010 como un IMT - Advanced que cumple con los requerimientos de los sistemas 4G. A pesar de su alta eficiencia espectral para los servicios de datos, LTE tiene que demostrar su capacidad para soportar un amplio número de llamadas de su voz a través de VoIP.

El gestor de recursos radio para llamadas de VoIP continuamente conmuta entre estados de actividad e inactividad. Las limitaciones de los canales de control evitan la asignación de manera dinámica. La asignación semipermanente habilita la calidad del canal consciente de las limitaciones del canal de control.

4.2.2 ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS RADIO

La asignación de recursos radio está centrada en el aumento de la capacidad. Los resultados demuestran que el aumento se consigue gracias a estrategias de asignación de recursos inteligentes.

IMT-A. Método para estimar la capacidad de VoIP de un sistema.

La transmisión de voz juega un importante papel en las redes de comunicaciones inalámbricas. LTE está basada en redes IP pero a diferencia de GSM y UMTS no hay conmutación de circuitos para la transmisión de voz.

La conmutación de paquetes para tráfico de voz aumenta la eficiencia de la multiplexación de las conexiones con el mismo origen radio. La desventaja es la capacidad limitada de una red de conmutación de paquetes para garantizar que se cumplen los requisitos de una determinada QoS.

Se consideran **dos estados**, **usuario activo**, es decir, hablando y **usuario inactivo**, escuchando. Se transmite una "Packet Data Unit" (PDU) de 248 bits cada 20 ms en estado activo, resultando en total 344 bits si se le suman las cabeceras de capas inferiores. En estado inactivo se transmiten 40 bits Silence Insertion Description (SID)-PDU, que se transmiten cada 160ms, resultando en total 144 bits. La transición de un estado dura 2 segundos.

Los usuarios se consideran satisfechos si la probabilidad de pérdidas de paquetes es inferior al 2%. Un paquete se considera perdido si no se recibe en 50 ms. La QoS de la VoIP se alcanza si el 98% de los usuarios están satisfechos.

Descripción del problema

La Figura 4-1 muestra la codificación del enlace descendente OFDMA. En el dominio de la frecuencia 25 RB's pueden ser ocupados por un usuario. Un Transport Block (TB) lo forman varios RB consecutivos. Los RBs vacíos entre TBs se llaman espacios.

Cada TB contiene datos para un "User Terminal" (UT).

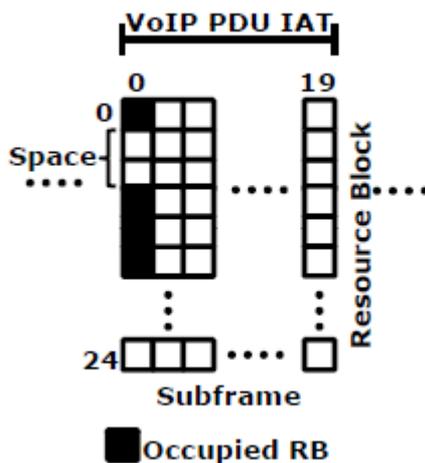


Figura 4-1: OFDMA rejilla LTE para 5 MHz de Ancho de Banda.

- **Asignación bajo las limitaciones de capacidad del canal de control**

Con asignación dinámica se utiliza un Canal físico (PDCCH) por cada UT. El canal PDCCH contiene aproximadamente 20 Control Channel Elements (CCEs) en 5MHz de ancho de banda y tres símbolos por cada subtrama reservados para control de tráfico. La cantidad de CCE's requerida para transmitir a un usuario depende de la calidad del enlace descendente en el UT. Si SINR=4dB, es suficiente para transmitir el PDCCH contenido en un CCE. Valores inferiores de SINR requieren 2, 4 u 8 CCE's.

En el enlace descendente, el PDCCH informa que RB's podrían ser monitorizadas del tráfico entrante.

- **Resource Assignments**

El número de RB's consecutivos, dependen de la calidad del canal de los RB's seleccionados.

- **Time Varying Channel Conditions**

El nivel de interferencia de un RB depende del número de nodos que transmiten a la vez. El peor caso, en el enlace descendente es que el RB es utilizado por todos los Nodos eNB próximos.

- **Delay**

La transmisión de una subtrama supone 1ms y otros 3ms de retardo para la decodificación.

Algoritmo de asignación:

Resource Assignment Strategies

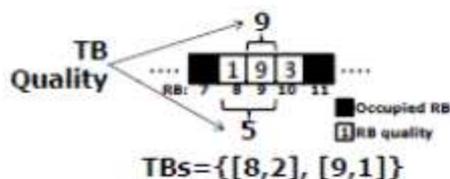


Figura 4-2: Ejemplo de asignación de un TB

La Figura 4-2 muestra 3 RB's con diferente calidad cada uno. Si la calidad media está por encima de 4, un TB tamaño de 1RB es posible, si no 2 RB's. RB8 no puede proveer la suficiente calidad para un TB tamaño 1, entonces RB8 y RB9 son seleccionados con calidad media 5, suficiente para ajustarse a los datos. El TB comienza en RB8 con tamaño 2 es añadido al conjunto de TB potenciales. El siguiente TB comienza en RB9 es evaluado. La calidad es suficiente para formar un TB de tamaño 1. A continuación, la Figura 4-3 representa el algoritmo de asignación.

La estrategia utilizada para seleccionar un TB fuera del conjunto de TB candidatos puede ser considerar el tamaño del TB y el tamaño de los espacios resultantes.

Las siguientes estrategias son aplicadas:

- **First:** utiliza el primer TB del conjunto de TB's. Supone alta interferencia en el primer RB en todas las celdas mientras que los RB's con altos índices presentan poca interferencia.
- **Random:** Se elige un TB. Supone distribución igual de las interferencias.
- **Bestfit:** se elige el TB que mejor se ajusta a un espacio. Las diferencias entre longitud de espacio y longitud de TB son mínimas.
- **Least Fit:** se elige el TB que se ajustará a su espacio. Las interferencias son bajas en pequeños tamaños de TB.
- **Smallest:** se elige el TB más pequeño. Selecciona RB's con menos interferencia.

Descripción del algoritmo:

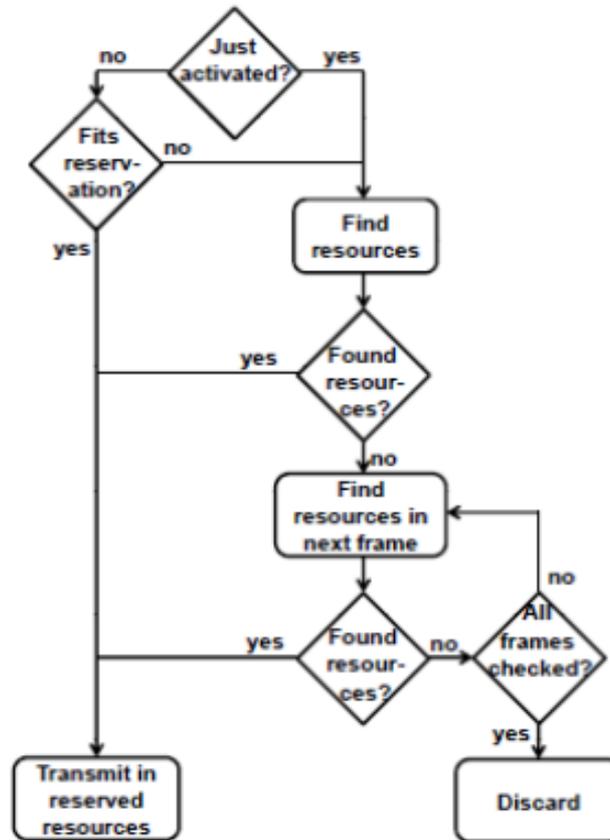


Figura 4-3: Esquema del algoritmo de asignación en el DL

4.3 MODELO MATEMATICO QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO EN INTERNET

Un aspecto interesante que hemos abordado en este proyecto es el comportamiento del tráfico [18] en internet. En las redes LTE el tráfico [19] que se maneja son datagramas IP, sabemos cómo funciona la red IP desde que un emisor transmite información a un receptor. Sabemos que esta información se codifica en forma de bits se encapsula en datagramas hasta llegar al nivel de red para ser transmitido, también sabemos que funciona por conmutación de paquetes y que se aplica el best-effort¹⁰ [20] para entregarlos pero ¿qué modelo describe este funcionamiento?. ¿Qué modelo describe la generación de paquetes?.

¹⁰.Hace todo lo posible por entregar los paquetes.

Los modelos matemáticos que describen el comportamiento de las fuentes son necesarios para minimizar efectos de pérdida y mantener la QoS tanto de las nuevas llamadas como de las que ya se están cursando. Se necesita disponer de controles de admisión de conexiones (CAC) que decidan si se puede admitir una nueva llamada, así como de mecanismos de control de la congestión. Para ello son necesarias expresiones matemáticas que describan el comportamiento de las fuentes; es decir, necesitamos **modelos matemáticos de tráfico**.

¿Cómo se comportan las fuentes?

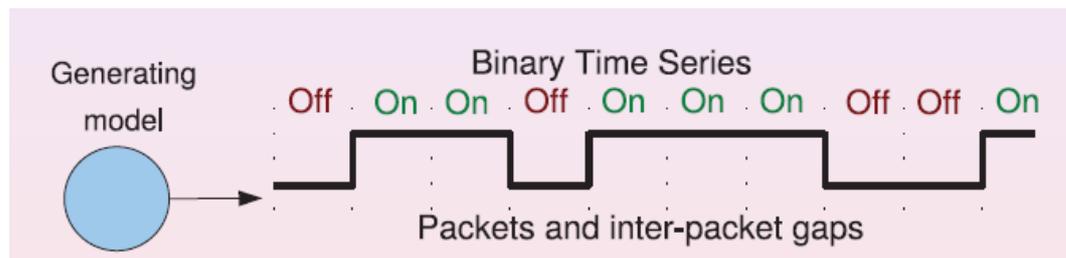


Figura 4-4: Modelo de Generación de tráfico

En la Figura 4-4 se puede observar un modelo de Generación de Tráfico.

Para llegar a generar buenos modelos, es necesario estudiar y entender el comportamiento estadístico de las fuentes de información multimedia (voz, audio y vídeo) que serán transportadas por las redes.

Fuentes de datos: los generadores de datos más habituales serán los servidores Web, las transferencias de ficheros (FTP), las conexiones remotas (Telnet) y los *chats, etc.* Es decir, casi todos los servicios presentes hoy por hoy en las redes TCPI/IP (Internet). Estos servicios tienen comportamientos muy diferentes. presenta largas transferencias de información.

Fuentes de audio: lo más habitual es que la señal transmitida sea de voz, por lo que se aprovechan las características del habla humana, que se presenta a ráfagas (talk spurts) con silencios intercalados entre palabras y entre frases. Por ello lo más habitual es que los codificadores de voz (GSM, por ejemplo) incorporen detectores de silencios, durante los cuales no transmiten información.

Fuentes de vídeo de tasa variable (VBR): son muy dependientes del tipo de codificador usado. En general, presentan una cantidad no despreciable de correlaciones, a diferentes niveles (línea, bloque, cuadro, escena). Los codificadores aprovechan la alta redundancia espacial y temporal de las señales de vídeo para conseguir factores de compresión elevados. Por ello las señales de vídeo de estos codificadores son de tasa variable, y repiten un esquema en el que aparecen imágenes codificadas.

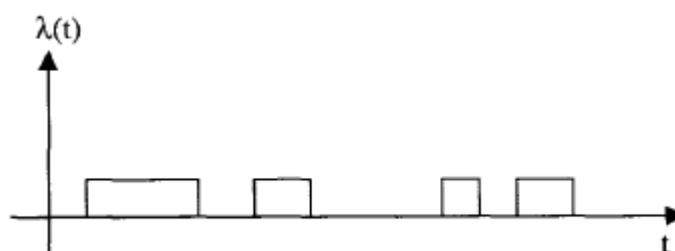


Figura 4-5: Posible traza de voz

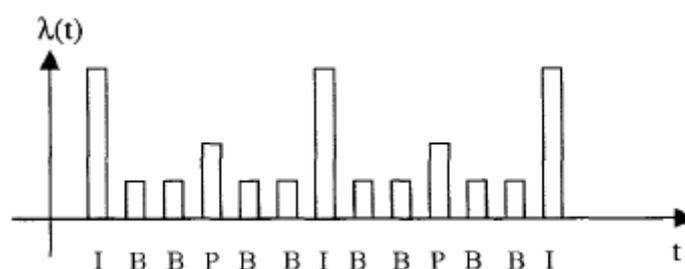


Figura 4-6: Posible traza de un codificador

La principal característica de los modelos de tráfico es que no contemplan la posibilidad de que las trazas procedentes de las fuentes presenten dependencia a largo plazo.

La **autocorrelación** de una serie temporal (en nuestro caso, la serie temporal es el “throughput” de la fuente medido en bits/segundo o equivalentemente, en celdas/segundo) indica cuál es la dependencia que existe entre los datos de la serie separados en una cierta cantidad de muestras. Es decir, qué grado de similitud existe entre las muestras analizadas en un instante t_0 y las muestras emitidas en $t_i = t_0 + 1$. Si la autocorrelación de la serie generada por una fuente decae rápidamente con la separación 1, las tasas emitidas por la fuente tendrán poco que ver con los emitidos 1 unidades antes. Si la autocorrelación decae lentamente, existirá una dependencia a largo plazo.

¿Cómo se puede modelar el tráfico?

En el caso de la voz los procesos que más se aproximan al fenómeno *talk spurt son* los que se basan en una cadena de Markov de dos estados (*on* y *off*). Estos modelos, ampliamente utilizados, intentan describir una fuente que emite información a ráfagas, de manera que en el estado *on* se generan paquetes de voz y en el estado *off* hay silencio. Dependiendo de la distribución del proceso de llegadas cuando la fuente se encuentra en estado activo, se pueden considerar dos tipos de procesos: Bernoulli Interrumpido o Poisson Interrumpido. Si suponemos que las llegadas siguen se producen según Poisson, el tiempo de estancia en los estados está exponencialmente distribuido con medias a α^{-1} y β^{-1} , respectivamente.

Los procesos de Poisson interrumpidos son una particularización del caso anterior, donde el estado activo se corresponde con llegadas distribuidas exponencialmente con media 1. La agregación de fuentes de voz se puede modelar como un proceso de nacimiento y muerte con $N+1$ estados, que resulta de encadenar N procesos on-off. (Figura 4-7).

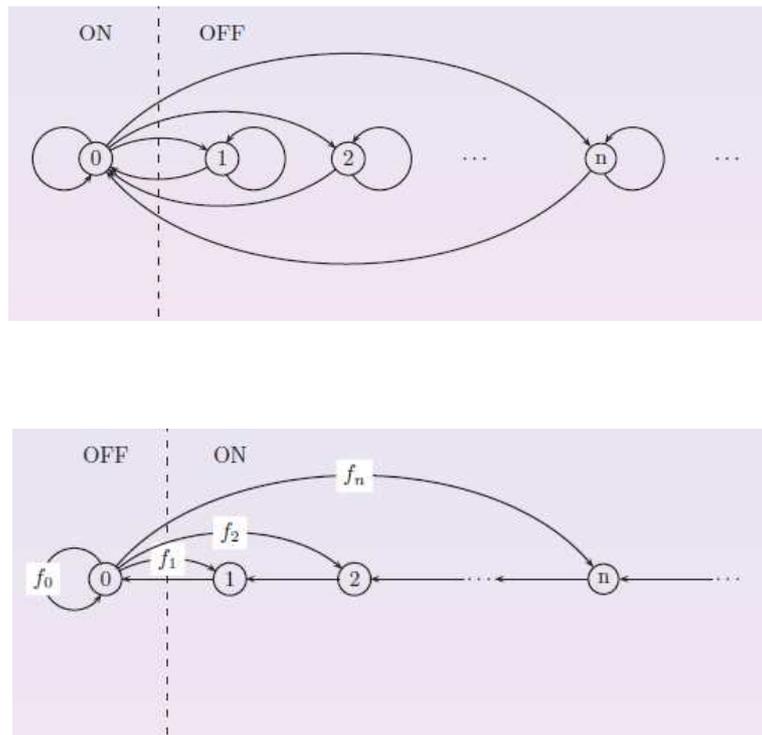


Figura 4-7: Procesos ON-OFF y viceversa

Los datos que se manejan en internet tienen una elevada correlación, es decir apenas varían de unos a otros a medida que pasa el tiempo.

Si $\sum_{k=-\infty}^n |\varphi(k)|$ diverge, donde $\varphi(k)$ es la función de autocorrelación:

$$\varphi(k) \sim Ck^{-\alpha} \quad [4.1]$$

$$k \rightarrow \infty$$

$$C > 0 \text{ y } \alpha \in (0, 1)$$

Los parámetros H son la medida más común de la función de correlación:

$$H = 1 - \alpha/2 \quad \alpha \in (1/2, 1) \quad [4.2]$$



Los modelos que han tratado de describir el comportamiento del tráfico en internet en orden cronológico son:

- Poisson
- Browniano
- Wang – Markov Modulated Process (MMP)
- Pseudo correlación de tráfico - MMP
- Arrowsmith /Barenco - MMP
- Clegg /Dodson - MMP

Los procesos de Markov modulados, también llamados procesos doblemente estocásticos, que usan una cadena de Markov que define (según el estado en el que nos encontremos) la distribución de probabilidad del tráfico. Es decir, la cadena "modula" el proceso de generación. Un Markov Modulated Poisson Processes (MMPP) usa un proceso de Poisson como proceso modulado, es decir, el que cambia el ritmo de generación de llegadas según el estado en el que nos encontremos (a un estado S_k le corresponde un proceso de Poisson con media λ_k). Mediante los MMPP, se puede conseguir que el modelo de tráfico sea analíticamente abordable. Para ello, se cuantifica la tasa de llegada en diferentes niveles, que se corresponden con los estados de la cadena de Markov que está representada en la Figura 4-8. Las probabilidades de transición del estado i al j , q_{ij} , se pueden estimar a partir de los datos empíricos mediante el cálculo de la fracción de la cantidad de veces que se produce dicha transición, respecto a la cantidad total de transiciones. Es fácil observar que un MMPP de $M+1$ estados se puede formar a partir de la superposición de M procesos independientes e idénticamente distribuidos (IPP). Los MMPP se han aplicado en algunas ocasiones para modelar mezclas de tráfico de voz y datos. Para ello, consideramos que el MMPP modela el tráfico de voz, de manera que el estado k se corresponde con un tráfico de voz de tasa λ_k , mientras que el tráfico de datos se considera poissoniano con media λ_d . Así, el tráfico total generado es $\lambda_k + \lambda_d$.

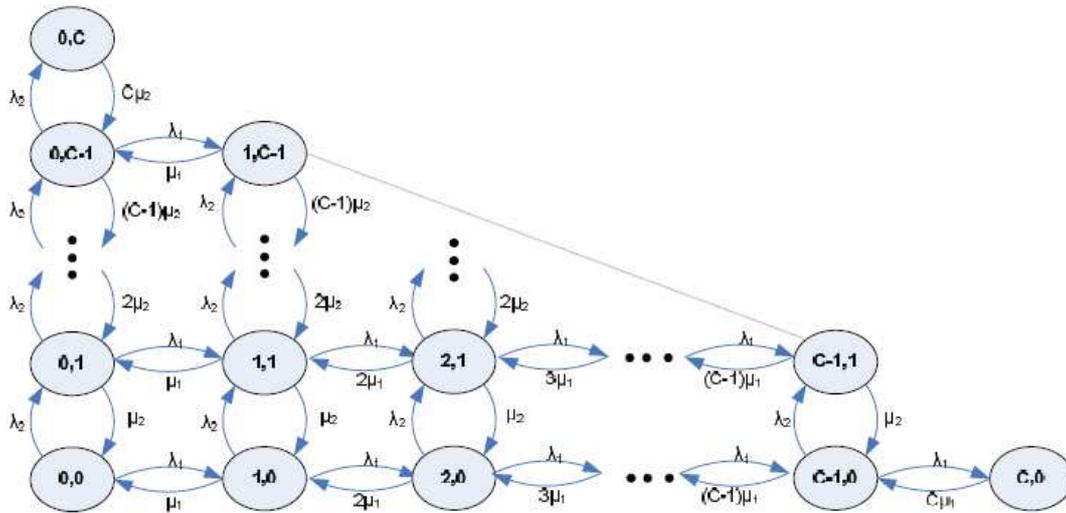


Figura 4-8: Cadena Markov Binomial para dos tipos de tráfico.

Por un lado, en el tráfico propio de paquetes de datos se caracteriza por llegadas de paquetes IP, en concreto, por medio del tiempo entre llegadas de los datagramas IP y el tamaño de cada datagrama. Por otro lado, el proceso de servicio de los radio bloques se caracteriza por medio del estudio del proceso de servicio del radio bloque y su tiempo de servicio. A continuación se muestran las Figuras 4-9 y 4-10 del modelo Markov [21] para el caso en que el sistema está formado por N fuentes iguales on-off, con N +1 estados y para N=1 respectivamente.

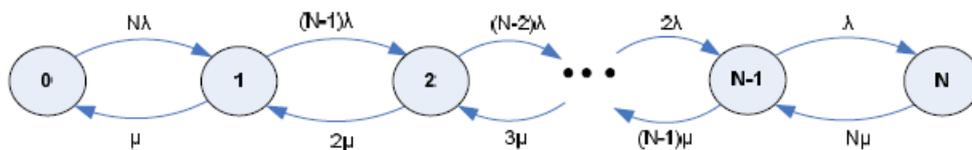


Figura 4-9: Cadena Markov unidimensional para un proceso NIRP.

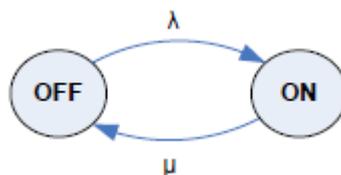


Figura 4-10: Cadena Markov para un solo proceso, N=1, IRP.



5 PLANIFICACIÓN

5.1 OBJETIVO: DESPLIEGUE DE UNA RED LTE EN EL SURESTE DE MADRID

La fase de despliegue de una red LTE va precedida de una fase de planificación en la que se deben tener en cuenta varios factores para lograr que la red cumpla con la calidad de servicio requerida. Así pues la implantación de la red se va a llevar a cabo en dos fases:

- Fase de planificación
- Fase de diseño

La planificación se realiza en 4 fases como se podrá observar a lo largo de este proyecto:

1. Fase 1: Balance de Potencias Inicial
2. Fase 2: Simulaciones del entorno
3. Fase 3: Puesta a punto y optimización
4. Fase 4 : Optimización post-despliegue

5.2 PANORÁMICA DEL DESPLIEGUE

Se establece nuestro objetivo que es proporcionar cobertura a un conjunto de pueblos de la zona Sureste de Madrid.

La herramienta que se empleará será el software de libre distribución “Radio Mobile” que cuenta con las herramientas suficientes para realizar una buena planificación.

Además para realizar cálculos como el flujo de datos se va a utilizar la herramienta “LTE in Bullets”.

Se situaran aleatoriamente UE y eNodo y se simularan radio enlaces entre usuarios y nodos para observar si cumplen objetivo como por ejemplo cumplir un valor determinado de SINR.

Todos los radio enlaces sufren pérdidas debidas a factores ambientales, características del entorno, etc. Radio Mobile modela estas pérdidas según el modelo Longley and Rice, es el más apropiado para entornos rurales y del que se hablará en el apartado Modelos de propagación.

5.3 CALIDAD DE SERVICIO

En la fase de planificación se realizan simulaciones para comprobar que la red LTE diseñada cumple los requisitos de QoS, deseados.(ver Figura 5-1)

La ITU define la QoS como:

“Efecto global de la calidad de funcionamiento de un servicio que determina el grado de satisfacción del usuario” [22].

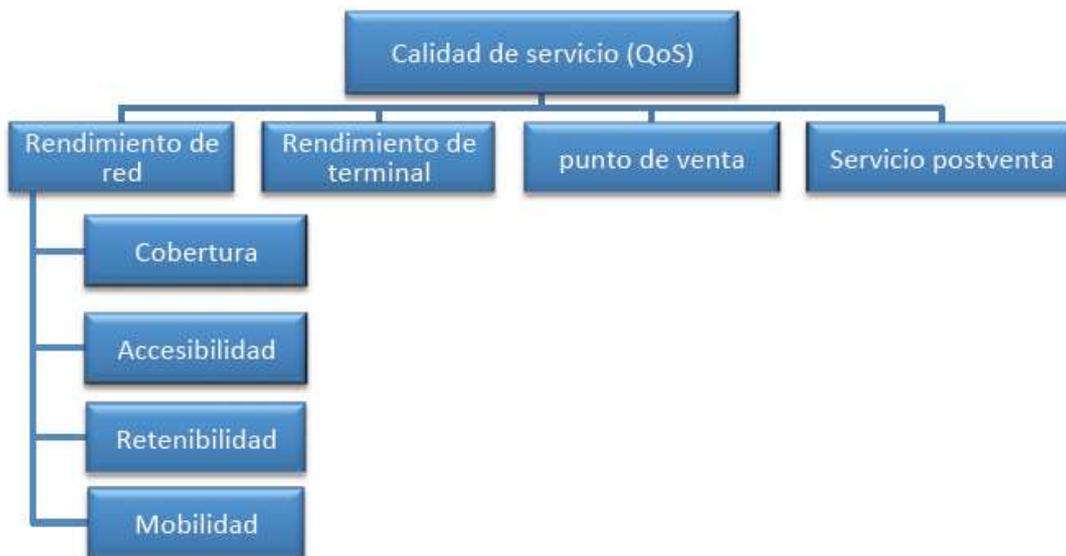


Figura 5-1: Parámetros de QoS

Los parámetros de calidad para LTE fueron definidos a partir del Release 8 de la 3GPP donde se definió que estos parámetros están basados por bearer para el caso de gateways en GTP o por servicio, basados en los gateways basados en PMIP.

Los parámetros de QoS son los siguientes:

- Quality Class Identifier (QCI)
- Allocation and Retention Priority (ARP)
- Guaranteed Bit Rate (GBR)
- Maximum Bit Rate (MBR)

QCI. Es un identificador que diferencia los servicios o tipos de tráfico por medio de un identificador. Este es el concepto clave para entender la calidad de servicio en LTE, ya que a todos los bearers de un UE se le asigna un QCI.

En total son 9 diferentes QCI, estos QCI se dividen en 2 grupos principales: GBR y non-GBR, donde GBR asegura que van a tener cierto ancho de banda garantizado, y non-GBR puede ser cualquier velocidad, ya que no tiene ancho de banda reservado.

5.4 MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN

En LTE es muy importante tener en cuenta la modulación y codificación que se va a emplear en cada momento. La elección de la modulación adecuada se llama "Adaptación dinámica del enlace". En LTE se implementa un mecanismo de adaptación dinámica del enlace basado en control de la tasa binaria (rate control), que consiste en ir variando la tasa binaria asignada a un

usuario activo en función de la calidad del canal. De este modo, el usuario percibirá una tasa binaria alta si la calidad del canal es buena y baja si no lo es.

El objetivo es conseguir el máximo rendimiento del canal (en términos de velocidad de transmisión) mediante el tipo de modulación que permita enviar el mayor número de bits por símbolo dada una SINR. Para valores bajos de SINR se empleará modulación y codificación QPSK que se caracteriza por la baja eficiencia espectral y por su baja tasa binaria. En los casos en los que la SINR es alta, la modulación que se emplea es 16-QAM o 64-QAM.

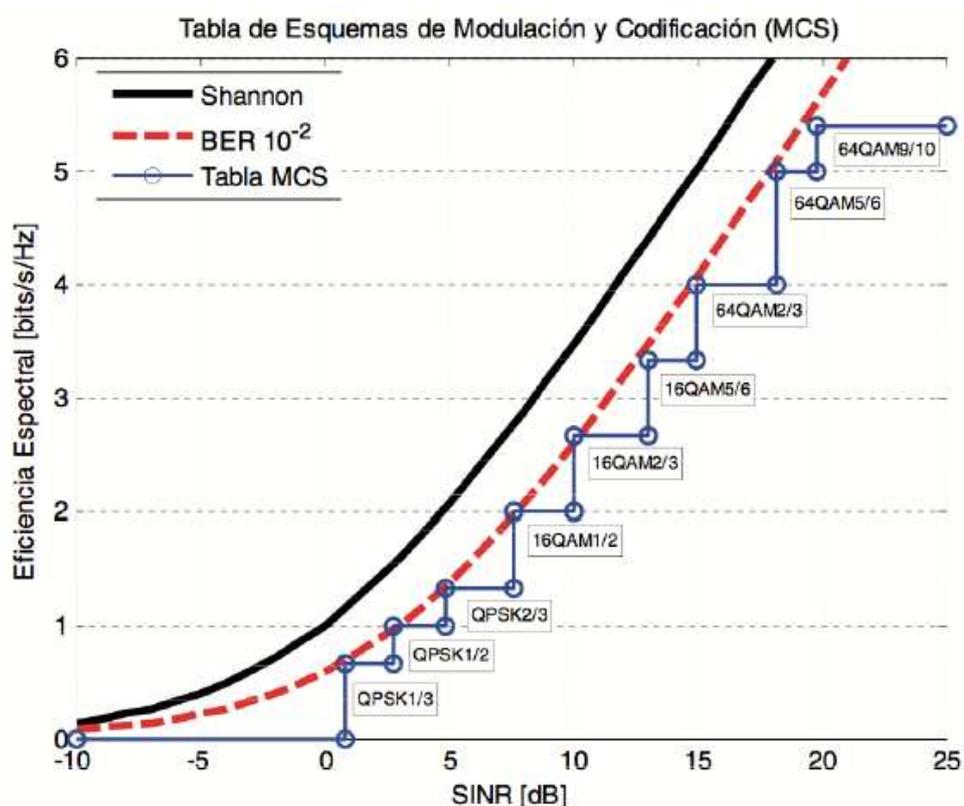


Figura 5-2: Modulación para distintos valores de SINR.

La Figura 5-2 representa gráficamente la variación de SINR en función de la eficiencia espectral.

5.5 MODELOS DE PROPAGACIÓN

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y Algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado.

Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi-empíricos).

Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor móvil o fijo. La ventaja de modelar radiocanales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos.

La Figura 5-5, representa tres factores a tener en cuenta para aplicar los modelos de propagación:

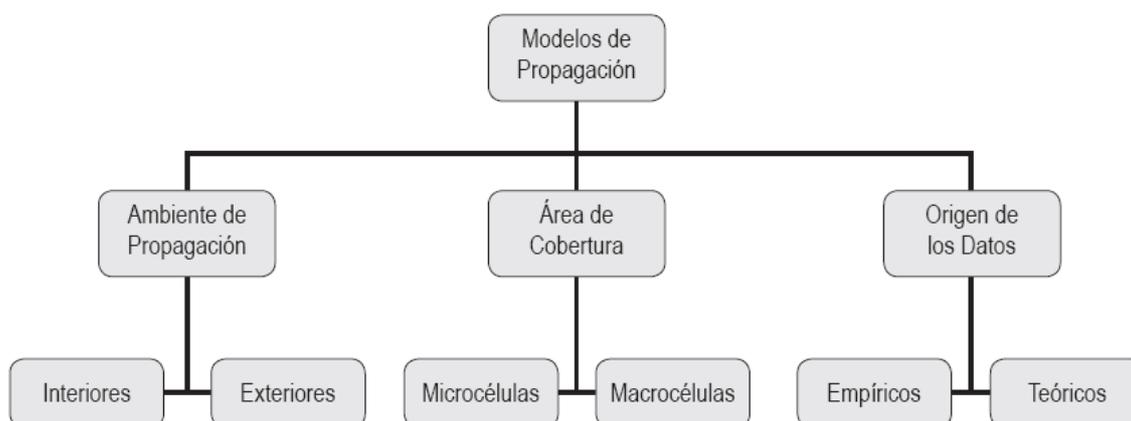


Figura 5-3: Modelos de propagación

En un principio cuando aparecieron las redes inalámbricas se utilizaban pocas antenas y ubicadas a una gran altura. Esta implementación era válida debido a que la demanda por el servicio era mínima. Con el aumento del número de usuarios fue necesario disponer de más antenas y canales, con lo cual fue necesario poder hacer re-uso de las frecuencias, lo que permite volver a utilizar el mismo canal en otro lugar. Entonces para disminuir al máximo la interferencia en los límites de las celdas se debió obtener mejores predicciones de cobertura

Actualmente en la literatura se pueden encontrar 4 tamaños de celdas: Macro Celda, Mini Celda, Micro Celda y Pico Celda. La definición del tamaño de cada una de estas varía en la misma, en los siguientes párrafos sólo se abordara las Macro y Micro celdas.

En la Figura 5-4 se muestran algunas características de éstas.

Tipo de Celda	Radio de la Celda	Posición de la antena TX
Macro Celda	1 a 30 Km.	Outdoor, montada sobre el nivel de los techos, las alturas que la rodean son menores a ésta.
Micro Celda	0.5 a 5 Km.	Outdoor, montada a una altura menor que la mayoría de las edificaciones, y las que la rodean son más altas.

Figura 5-4: Tipos de celdas y sus características.

Los modelos que se presentan en la Figura 5-7 están clasificados en teóricos y empíricos, en los primeros se debe tener mayor información acerca de la ciudad en particular y la estructura de las edificaciones. Por otro lado los modelos empíricos fueron desarrollados utilizando una serie de mediciones, de las cuales se obtuvieron las fórmulas de propagación.

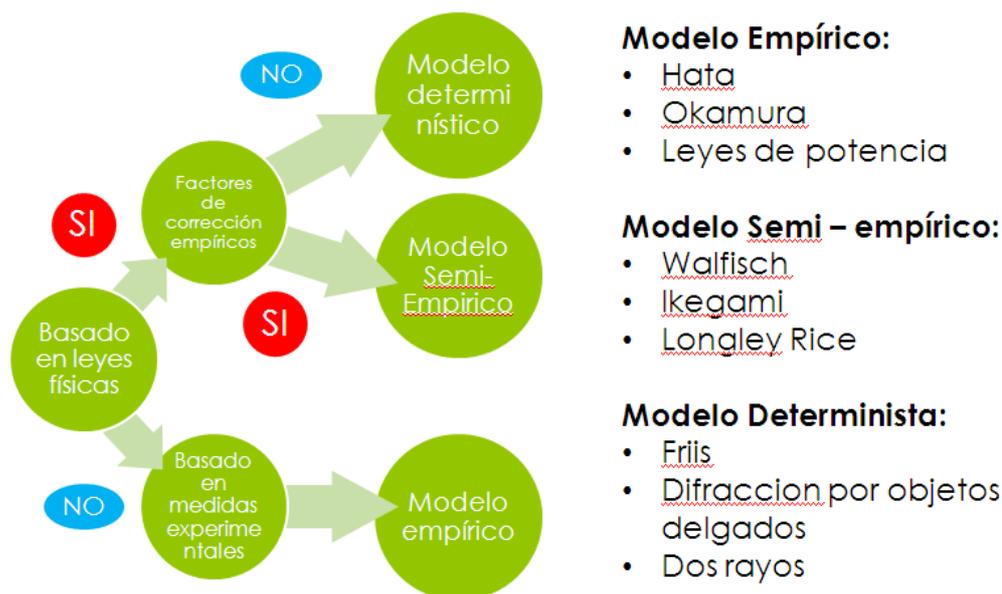


Figura 5-5: Modelos de pérdidas

5.5.1 OKUMURA – HATA

Se hace mención de este modelo de pérdidas pero no será el que se aplicará para los cálculos de este proyecto porque se considera adecuado para entornos urbanos y la frecuencia de estudio es superior a la máxima para este modelo, 1500MHz.



5.5.2 MODELO COST-231

El modelo COST-231 es un modelo semi-empírico de predicción de las pérdidas en un trayecto, extensión en frecuencia de modelo de propagación Okumura – Hata. Se utiliza para frecuencias menores a 2000MHz, aunque también es utilizado en predicciones para frecuencias de 2,5GHz y asumiendo una menor precisión de resultados se puede considerar como válido hasta 3,5GHz.

Se recomienda para macrocélulas en escenarios urbanos y suburbanos, con buenos resultados de las pérdidas en el trayecto para antenas transmisoras situadas por encima de la altura media de los tejados

El modelo indica las pérdidas mediante la siguiente ecuación:

$$L = 46.3 + 33.9 * \log fc - 13.82 * \log h_{tx} - a(h_{rx}) + (44.9 - 6.55 * \log h_{tx}) * \log d + CM \quad [5.1]$$

C es un factor de corrección para adecuar el modelo extendiendo el rango de frecuencias para el que opera el modelo. Se basa en pruebas empíricas, las cuales demuestran que para grandes ciudades es mayor que para áreas suburbanas. Entonces C puede tomar los siguientes valores:

$C = 0$ dB para ciudades medianas y áreas suburbanas

$C = 3$ dB para centro metropolitanos

5.5.3 MODELO LONGLEY AND RICE

El modelo Longley-Rice predice la posible propagación a larga-media distancia sobre terreno irregular. Fue diseñado para frecuencias entre los 20MHz y 20GHz, para longitudes de trayecto de entre 1 y 2000 Km.

También es un modelo estadístico pero toma en cuenta muchos más parámetros para el cálculo de las pérdidas:

- Altura media del terreno (ondulación)
- Refracción de la troposfera
- Perfiles del terreno
- Conductividad y permitividad del suelo
- Clima

Para el cálculo de la propagación, el modelo Longley-Rice tiene los siguientes parámetros comunes al de otros modelos de propagación:

Frecuencia: el rango de frecuencias nominales para el modelo varía entre 20MHz y 20GHz.

Effective Radiated Power (ERP): potencia efectiva de radiación, se introducen en las unidades que fije el usuario en la opción de configuración del sistema (mW, W, kW, dBm, dBW, dBk).

Debe especificarse si se trabaja con polarización horizontal o vertical. El modelo de Longley-Rice asume que ambas antenas tienen la misma polarización, vertical y horizontal.

Refractividad: la refractividad de la atmósfera determina la cantidad de “bending” o curvatura que sufrirán las ondas radio. En otros modelos, el parámetro de refractividad puede introducirse como la curvatura efectiva de la tierra, típicamente 4/3 (1.333). Para el modelo Longley-Rice, hay tres formas de especificar la refractividad. Se puede introducir el valor de refractividad de superficie directamente, típicamente en el rango de 250 a 400 Unidades N (correspondiente a valores de curvatura de la tierra de 1.232 a 1.767). Una curvatura efectiva de la tierra de 4/3 (=1.333) corresponde a una refractividad de superficie de valor aproximadamente 301 Unidades N. Longley y Rice recomiendan este último valor para condiciones atmosféricas promedio. Se dice que la onda está en condiciones de $k = 4/3$, que es el valor para una atmósfera estándar, ya que de acuerdo a valores experimentales se encontró que éste era el valor medio.

De manera que el factor k multiplicado por el radio terrestre da el radio ficticio de la Tierra. La relación entre los parámetros “ k ” y “ n ”, viene dada por la siguiente expresión:

$$N_s = 179,3 \times \text{Ln} \left[\frac{1}{0,046665} \times \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right] \quad [5.2]$$

Para el cálculo de las pérdidas el modelo usa la teoría de la difracción, la refracción troposférica y el scattering [23] del terreno. Las pérdidas adicionales están basadas en medidas tomadas en varias situaciones.

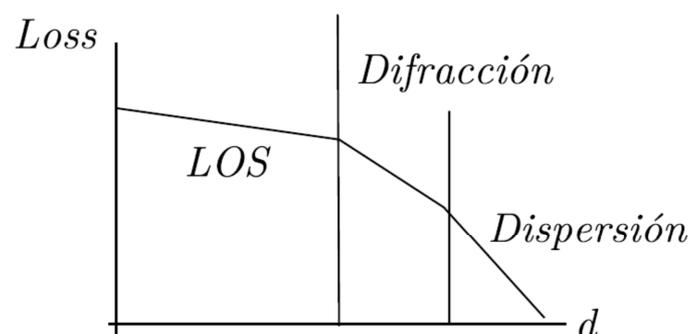


Figura 5-6: Pérdidas Longley and Rice



Las pérdidas por difracción sobre obstáculos aislados son estimadas usando los modelos de filo de cuchillo de Fresnel-Kirchoff [24]. La teoría de dispersión hacia delante (Forward scatter) se usa para hacer las predicciones de la dispersión troposférica sobre largas distancias [25], y las pérdidas por difracción del campo lejano en trayectorias de doble horizonte se predicen por un método modificado de Van der Pol-Bremmer. El modelo de predicción de propagación de Longley-Rice [26] también se le conoce como el modelo de terreno irregular ITS.

Ha habido muchas modificaciones y correcciones al modelo de Longley-Rice desde su publicación original. Una modificación importante trata con la propagación de las ondas de radio en áreas urbanas, y esto es particularmente relevante.

En el caso del software empleado en este proyecto, se requieren los siguientes parámetros para aplicar el modelo:

Parámetros del sistema	
Frecuencia	20 [MHz] a 20 [GHz]
Distancia	1 a 2 000 [m]
Potencia de Tx	10 [nW] a 1 [MW]
Sensibilidad de Rx	0.01 a 2 000 [μ V]
Pérdidas de la línea	0 a 500 [dB]
Ganancia de la antena	-10 a 100 [dBi]
Rango de alturas	arriba de 30 000 [m]
Polarización de la antena	vertical u horizontal
Parámetros ambientales	
Parámetro de irregularidad del terreno, Δh	
Permitividad y Conductividad	
Refractividad de la superficie, N_s	250 a 400 [unidades N]
Cima	7 opciones
Parámetros de implementación	
Criterio de ubicación	Aleatorio, cuidadoso
Parámetros estadísticos	
Confiability	0.1 a 99.9 %

Tabla 2 : Parámetros de entrada para el modelo Longley and Rice de Radio Mobile

Parámetros del sistema

Los parámetros del sistema son aquellos que están relacionados directamente al sistema de comunicación involucrado y que son independientes al ambiente. Es importante mencionar que la frecuencia es la frecuencia de la portadora, la distancia se refiere a la longitud del trayecto entre las dos terminales, la altura de la antena es de cada terminal y se mide por encima del suelo, las pérdidas de la línea promedio son de 0.5 dB y se asume que la polarización de las antenas en ambas terminales es la misma.



5.5.3.1 Parámetros ambientales

Los parámetros ambientales son aquellos que describen el ambiente en el que el sistema va a operar. Sin embargo, son independientes del sistema.

5.5.3.2 Parámetro de irregularidad del terreno

El parámetro de irregularidad del terreno, Δh , se refiere al terreno que separa ambas terminales y es tratada como una función aleatoria de la distancia entre las terminales. Para caracterizar esta función aleatoria el modelo ITS utiliza un valor Δh para representar de manera sencilla el tamaño de las irregularidades, dicho valor es el rango promedio de las elevaciones y los valores sugeridos se muestran a continuación en la Tabla.

	Δh [m]
Plano (agua tranquila)	0
Llanos	30
Colinas	90
Montañas	200
Montañas toscas	500
Terreno promedio	90

Tabla 3: Valores sugeridos de Δh

5.5.3.3 Permitividad y Conductividad

Tanto la permitividad relativa o constante dieléctrica del medio y la conductividad tienen valores típicos sugeridos que se muestran en la Tabla, a continuación:

	Permitividad Relativa	Conductividad [S/m]
Tierra promedio	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Tierra buena	25	0.020
Agua fresca	81	0.010
Agua de mar	81	5.0

Tabla 4: Valores sugeridos de permitividad y conductividad refractividad de la superficie

La refractividad de la superficie, N_S , determina la curvatura que sufrirán las ondas de radio al propagarse. Las constantes atmosféricas, y en particular la refractividad de la atmósfera, debe de ser tratada como una función aleatoria de la posición y del tiempo. Para la mayoría de los



propósitos esta función aleatoria puede ser caracterizada por el simple valor N_S que representa el valor normal de la refractividad cerca de los niveles terrestres; usualmente se mide en unidades N (partes por millón), los valores sugeridos son mostrados en la Tabla que está a continuación del párrafo siguiente.

5.5.3.4 Clima

Existen 7 tipos de clima que junto con N_S sirven para caracterizar la atmósfera y su variabilidad en el tiempo. Los climas disponibles se presentan en la Tabla siguiente:

Clima	N_S [unidades N]
Ecuatorial	360
Subtropical Continental	320
Subtropical Marítimo	370
Desierto	280
Templado Continental	301
Templado Marítimo, sobre la tierra	320
Templado Marítimo, sobre el mar	350

Tabla 5: Climas y valores sugeridos para N_S

Es importante mencionar que para condiciones atmosféricas promedio se utiliza un clima Templado Continental y un $N_S = 301$ [unidades N].

5.5.3.5 Parámetros de implementación

Los parámetros de implementación tratan de caracterizar las interacciones de las terminales dentro de un cierto tipo de ambiente. El modelo ITS ha previsto dicha interacción para cada terminal.

5.5.3.6 Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos son aquellos que describen el tipo y variedad de estadísticas que el usuario desea obtener.

Debido a la complejidad del modelo de pérdidas empleado, Longely and Rice, no se han realizado cálculos teóricos previos, se han obtenido del simulador. Este modelo data de la década de los años 60 y tiene en cuenta múltiples variables para su cálculo. Debido a su antigüedad no es fácil encontrar fórmulas matemáticas que permitan obtener pérdidas en cambio es fácil encontrar simuladores que lo calculen.



6 DESPLIEGUE DE LA RED

Establecido el objetivo de este proyecto, dotar de cobertura de red LTE a un área rural del sureste de Madrid, se comienza a realizar la planificación [27] teniendo en cuenta diversos factores.

Para realizar la planificación se necesita:

- Conocer los parámetros de un transmisor y un receptor. Características técnicas de una antena transmisora y receptora.
- Esquema de SINR
- Software Radio Mobile para el cálculo de pérdidas y simulación de la red
- Mapa de elevaciones de la zona a estudiar y Mapa topográfico.
- Fijar unas condiciones de servicio

6.1.1 CONFIGURACIÓN INICIAL

Instalada correctamente la herramienta de simulación Radio Mobile, se cargan los mapas de la zona dónde se va a llevar a cabo el despliegue. Radio Mobile no sólo carga un mapa según unas coordenadas sino que también carga parámetros como altitud, los accidentes del terreno, etc.

Las coordenadas de la zona de estudio son $40^{\circ}8' 30''N$ y $3^{\circ} 37'44''W$, con estas coordenadas se localiza un punto en el plano y a partir de este la dimensión de la zona a estudiar. En este caso esa zona es la correspondiente a los municipios atravesados por la carretera M-404 entre Ciempozuelos y Villarejo de Salvanes aproximadamente.

6.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS QUE FORMAN LA RED

Las características de los equipos que van a formar parte de esta red se muestran a continuación:

eNodoB	
Antena	
Ganancia: 18dBi Factor de Ruido: 0dB Pérdidas cable: 2dB	
Equipos	
TRANSMISOR	RECEPTOR
Potencia transmitida: 46dBm	Factor de Ruido: 2dB
UE	
Antena	
Ganancia: 0dBi Factor de Ruido: 0dB	
Equipos	
TRANSMISOR	RECEPTOR
Potencia transmitida: 24dBm	Factor ruido receptor: 7dB

Tabla 6: Características de los equipos de los nodos eNB y de los UE

6.1.3 UBICACIÓN DE USUARIOS Y NODOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La red está formada por nodo y usuarios que en software son identificados como eNB y UE, respectivamente. A estos elementos se les asigna un role y unas propiedades.



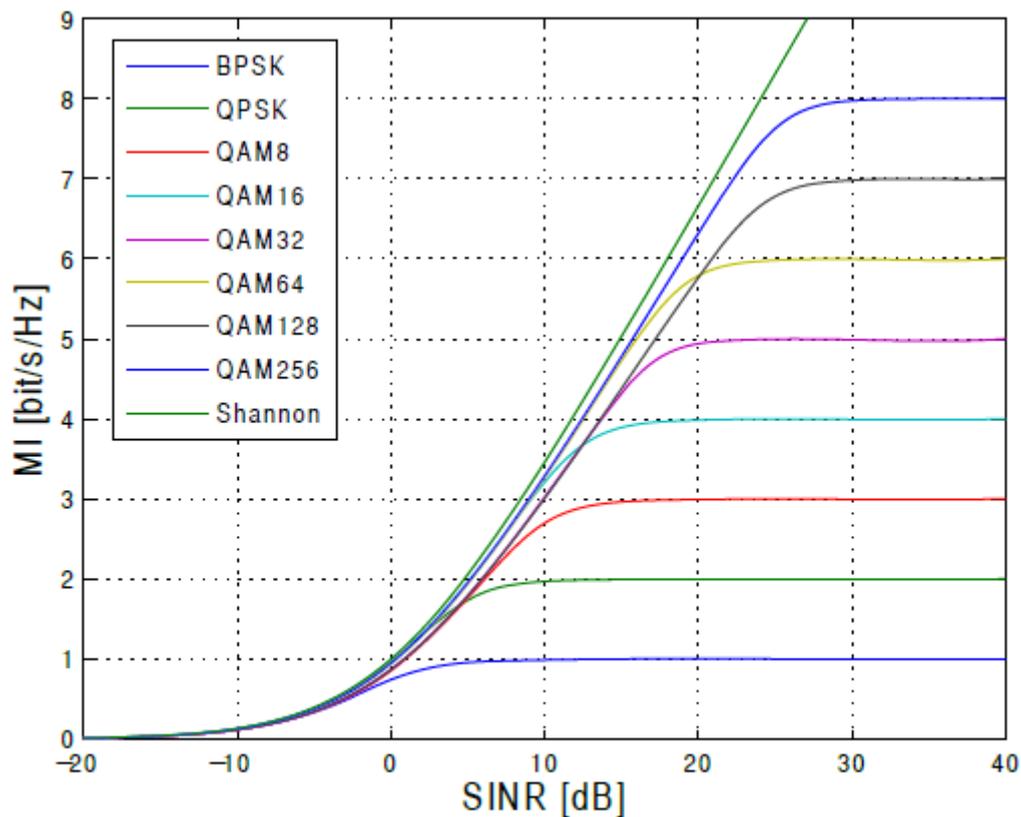
Figura 6-1: Zona de estudio

Los puntos elegidos para medir la potencia recibida de los nodos, mostrados en la Figura 6-1, son puntos situados a lo largo de la carretera M-404 entre localidades y en otros casos a su paso por el núcleo de población.

La ubicación de los nodos a priori sigue el criterio de un nodo por población y varios nodos que cubren tramos de carretera entre poblaciones.

6.1.4 ESTUDIOS DEL NIVEL DE LA SEÑAL

El estudio del nivel de la señal es un paso imprescindible para realizar la planificación. Se necesita fijar unos mínimos, es decir, unas condiciones de servicio. Se fijará como referencia una SINR que se toma de la Figura 6-2.



(a) Mutual information (MI) depending on SINR and PhyMode

Figura 6-2: MI vs SINR

Según la UIT para una BLER (Block Error Ratio), la SINR para el enlace descendente debe ser -4,3dB, y para el ascendente -7,3dB [26].

Establecida una SINR como referencia, mediante la fórmula de Shannon¹¹ [28]. se puede conocer la capacidad del canal:

$$C = B \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad [6.1]$$

Donde:

- C=capacidad del canal, tasa de bits por segundo
- B=ancho de banda del canal
- S=potencia de la señal útil expresada en W, mW, etc
- N=potencia de ruido presente en el canal que trata de enmascarar la señal útil.

¹¹. Claude Shannon desarrolló el concepto de capacidad de un canal basándose, en parte, en las ideas que ya habían propuesto Nyquist y Hartley y formulando, después, una teoría completa sobre la información y la transmisión de esta, a través de canales..



La Información Mutua MI, expresada como throughput normalizado como se puede observar en la Figura 6-2. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$MI(SINR, m) = \frac{1}{((s \times MI(SINR)) + m^{-w})^{1/w}} \quad [6.2]$$

$$MI(SINR, m) = \log_2(1 + 10^{SINR(dB)/10})$$

$$s = s(m) = 0,95 - 0,08(m \bmod 2)$$

$$w = w(m) = 2m + 1$$

$m = \text{índice de modulación: número de bits por símbolo}$

PHY: es el canal físico. La tasa de este canal se calcula multiplicando MI por la tasa del código.

La expresión que permite calcular la MI se obtiene de la fórmula de Shannon y de las características del funcionamiento de LTE.

Se calcula MI para los valores de SINR para los enlaces ascendente y descendente establecidos por la UIT:

DL:

$$MI = 0,455 \frac{\text{bits}}{s} / \text{Hz}$$

UL:

$$MI = 0,246 \frac{\text{bits}}{s} / \text{Hz}$$

Si por ejemplo se tomase otro valor de SINR como referencia, la eficiencia espectral variaría de esta manera:

SINR=-3dB

$$MI = 0,586 \frac{\text{bits}}{s} / \text{Hz}$$

$\eta = \text{flujo de información total}$

$$\eta = \frac{0,586 \frac{\text{bits}}{s}}{\text{Hz}} \times 180 \text{KHz} = 105,4 \text{Kbps}$$

SINR=-1,7dB

$$MI = 0,7398 \frac{\text{bits}}{s} / \text{Hz}$$



$$\eta = \frac{0,7398 \frac{\text{bits}}{\text{s}}}{\text{Hz}} \times 180\text{KHz} = 133,164\text{Kbps}$$

SINR=3dB

$$MI = 1,584 \frac{\text{bits}}{\text{s}} / \text{Hz}$$

$$\eta = \frac{1,584 \frac{\text{bits}}{\text{s}}}{\text{Hz}} \times 180\text{KHz} = 539\text{Kbps}$$

Se ha comentado anteriormente que en LTE se dispone de bloques de recurso para asignar a los usuarios, RB's. Cada RB está formado por 12 subportadoras, separadas por 15KHz, ocupando en total 180KHz cada RB.

A medida que aumenta la SINR aumenta la eficiencia espectral.¹²

6.1.5 CÁLCULO DE LA SEÑAL RSRP

Esta señal es una medida del usuario. Es un indicador de la calidad de servicio de la información que está recibiendo el usuario.

En este proyecto se va a obtener la probabilidad de cobertura a través de la "Signal to interference and Noise Radio" (SINR) y "Reference Signal Received Power" (RSRP) [29]. El estudio está basado en el usuario UE2 y las distintas posiciones que ocupa respecto del nodo eNodeB.

Se establece como condición:

$$\text{RSRP} \geq -116\text{dBm} \text{ y } \text{SINR} \geq 2$$

RSRP

Es una medida que proporciona una estimación de la señal recibida a nivel de celda. Es útil para tomar una decisión sobre procedimientos de cambios de celda como de handover. RSRP se mide como el promedio lineal sobre las potencias recibidas de los RE's que transportan las "Reference Signal" de una celda determinada en un ancho de banda especificado, en este caso 1,4MHz. La RSRP se mide sobre las potencias recibidas de los RE's que transportan la Reference Signal.

Este valor se obtiene partiendo de un BW=1,4MHz para este caso. Se sabe que en este ancho de banda se pueden tener 72 subportadoras, 6 RB's. La potencia que transmite la antena es

¹²Ver Gráfica "Mutual Information depending on SINR and PHYmode"

46dBm=39810mW que repartidos en 72 portadoras, son 553,9mW/portadora= 27,4dBm/portadora. La ganancia de la antena es 18dBi y las pérdidas del cableado son 2 dB. La potencia que radia de antena es 43,4dBm. En cada RB se dedican 4 RE's a señalización. Cada subportadora transmite 7 símbolos, en las que se transmiten RE's, sólo 6 transmiten información. Esta RSRP está calculada a nivel de celda. [30]

$$RSRP = 43,4dBm - Lpropagación\ en\ cada\ posición(dB) - 23(dBm) \quad [6.3]$$

Usuario	Distancia UE-eNodoB (Km)	RSRP (dBm)
UE2	16,7	-139,1
UE3	15,09	-108,7
UE4	13,05	-108,7
UE5	10,92	-117
UE6	8,61	-151,1
UE7	6,41	-161,1
UE8	3,51	-100,7
UE9	2,72	-110,8
UE10	3,34	-100,6
UE11	4,82	-154,6
UE12	6,1	-98,7
UE13	7,27	-101,8
UE14	8,1	-102,1
UE15	9,49	-144,2

Tabla 7: Valores de RSRP calculados

En la Figura 6-3 está marcado con un círculo el nodo “eNodoB” y una de las posiciones de medida, el resto de posiciones corresponden a los usuarios situados en la M-404.

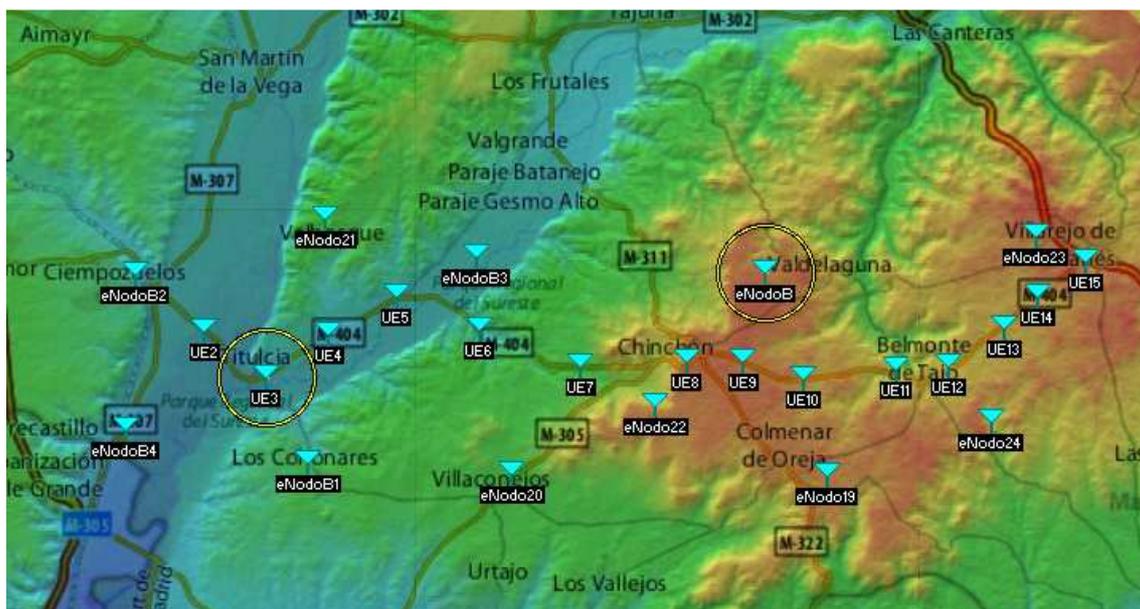


Figura 6-3: Posiciones de medida

A continuación se muestra el mismo plano (Figura 6-4) de la zona con las medidas de la señal RSRP de la tabla anterior:



	[0,-100]dBm
	[-100,-110]dBm
	[-110,-130]dBm
	[-130,-150]dBm
	[-150,-160]dBm

Figura 6-4: Medidas de RSRP

La Figura 6-5 muestra el perfil de esta señal:

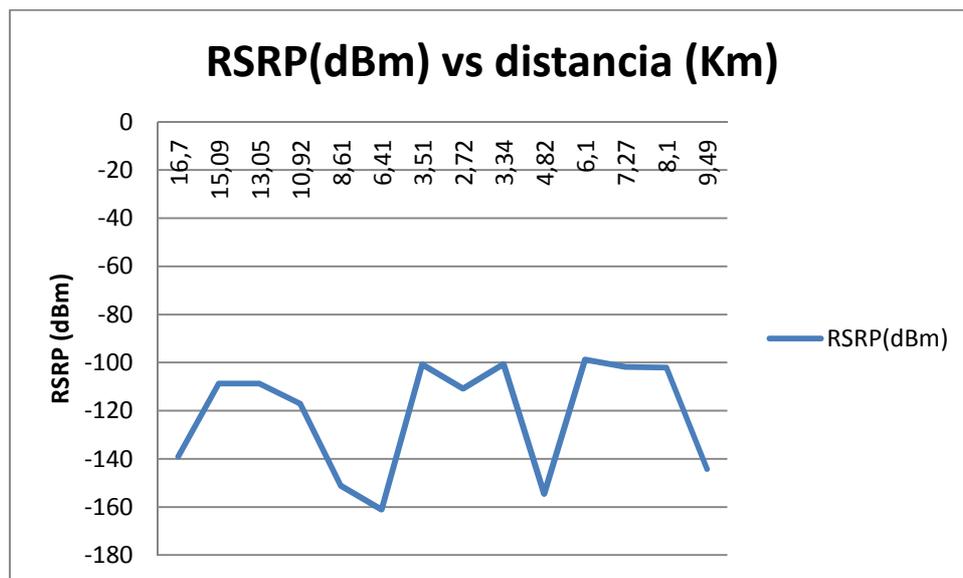


Figura 6-5: RSRP vs Distancia

6.1.6 ESTUDIO DEL ENLACE DESCENDENTE

En primer lugar se estudia el enlace descendente:

- Se fija una SINR.
- La fracción de potencia de eNodeB destinada a tráfico es β .
- La potencia destinada al UE es proporcional al ancho de banda $\frac{w_i}{w}$, donde w es el ancho de banda del nodo y w_i el ancho de banda destinado al usuario.
- NFR es la subida del suelo del ruido.

$$NFR = \frac{P_N + I_{ext}}{P_N} \quad [6.4]$$

La relación señal a ruido a partir de la potencia recibida es $SINR_i$:

$$SINR_i = \frac{P_r \beta^{W_i/W}}{I_{ext} + P_N} = \frac{P_r \beta^{W_i/W}}{P_N} \times \frac{P_N}{I_{ext} + P_N} = \frac{P_r \beta^{W_i/W}}{P_N \times NFR} = SINR_{obj} \quad [6.5]$$

La potencia recibida del nodo en unidades logarítmicas se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_r(dBm) = P_N + SINR_{obj} + NFR_i + 10 \log \left(\frac{W_i}{W} \right) - 10 \log \beta = -174 + F_{sis} + SINR_{obj} + NFR_i + 10 \log w - 10 \log \beta \quad [6.6]$$

Las pérdidas de propagación en el enlace se obtienen de la siguiente expresión:

$$L_b = P_{t_{eNB}} + \Sigma G_j - \Sigma L_j - P_r \quad [6.7]$$

6.1.6.1 DESPLIEGUE DE LA RED OBJETO DEL PROYECTO

La red LTE a desplegar tiene un ancho de banda de 1,4MHz. Con este BW el número de subportadoras puede ser 72 como máximo.

El número de RB's se obtiene:

$$N^{\circ}RB = \frac{N^{\circ}subportadoras}{12} \quad [6.8]$$

Se puede deducir que el número de RB será 2 como mínimo y 6 como máximo.



La sensibilidad del receptor nos da una idea de qué nodos serán interferentes y qué nodos no lo serán. Aquellos cuya potencia recibida por el usuario esté por debajo de la sensibilidad no serán considerados nodos interferentes.

Para obtener la sensibilidad se elige un tipo de **modulación**, en este caso será **QPSK**, con tasa de código $\frac{1}{2}$ a la que corresponde una **SINR= 2 dB**.

$$S = -174 + F_{sis} + 10\log w_i + NFR + 7 \times F^{-1}(0,75) + SINR = -174 + 4 + 10\log N^{\circ}RB + 10\log 180 \times 10^3 + SINR \quad [6.9]$$

Se calcula la sensibilidad para el caso en que sólo se tienen 2 RB's y 6 RB's y SINR = 2dB:

- 2RB's:

$$S = -112,43dBm$$

- 6RB's:

$$S = -107,67dBm$$

Con estos valores se puede observar cuál es la sensibilidad en una zona cercana al nodo, en la que se supone que habrá buena cobertura, en la que el "throughput" será mayor y corresponde con el mayor número de RB's.

La Figura 6-6 muestra el resultado obtenido del software LTE in bullets y permite dar una idea del "throughput" en una red LTE con un ancho de banda de 1,4MHz y una modulación QPSK con una tasa de código de $\frac{1}{2}$:

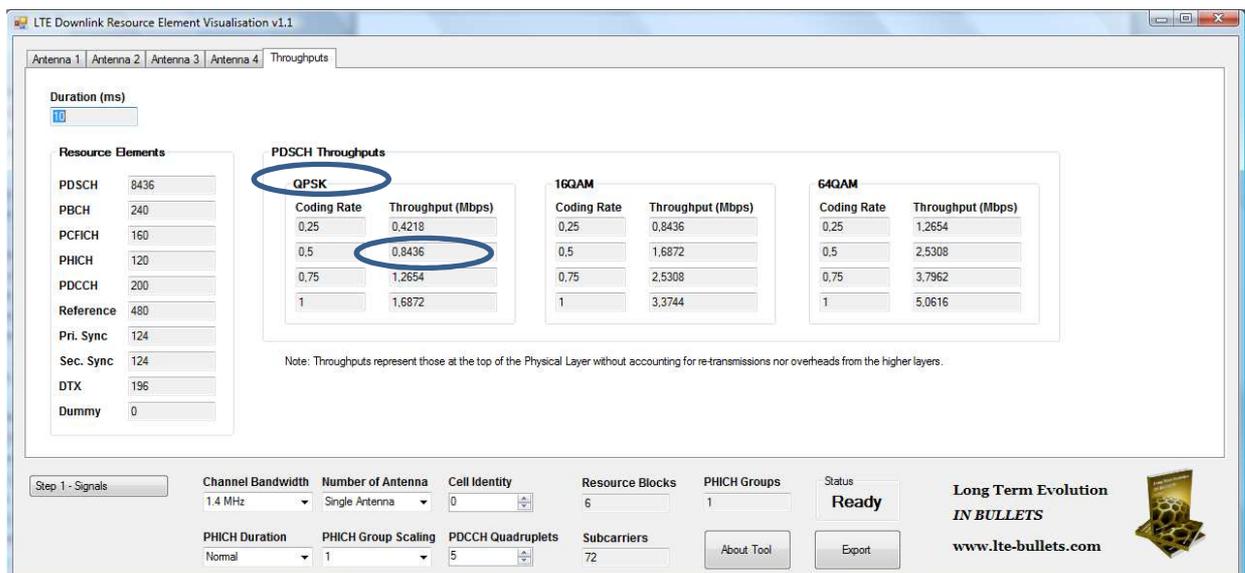


Figura 6-6 : Figura "throughput" del canal de tráfico PDSCH



Conocidas estos parámetros se puede calcular la potencia transmitida a un usuario. Se sabe que la antena del nodo transmite una potencia de 46dBm pero es necesario conocer la potencia transmitida a un solo usuario mediante la siguiente expresión:

- P_{ti} con 2RB's

$$P_{ti} = P_{tx} + 10\log w_i - 10\log w + 10\log \beta = 46 + 10\log 2 + 10\log 180 \times 10^3 - 10\log 1,25 \times 10^6 + 10\log 0,85 = 39,8dBm \approx 40dBm [6.10]$$

- P_{ti} con 6 RB's

$$P_{ti} = P_{tx} + 10\log w_i - 10\log w + 10\log \beta = 46 + 10\log 6 + 10\log 180 \times 10^3 - 10\log 1,25 \times 10^6 + 10\log 0,85 = 44,6dBm [6.11]$$

Mediante el simulador Radio Mobile se obtiene la potencia recibida de cada nodo por el usuario en cada posición de la carretera M-404.

Para obtener la SINR se han situado distintos nodos al azar en la zona de estudio. El número de nodos es elevado para simular el caso peor, que sería el caso en el que hubiese más interferencias.

Los parámetros que caracterizan cada elemento de la red se muestran en las Figuras 6-7 y 6-8:

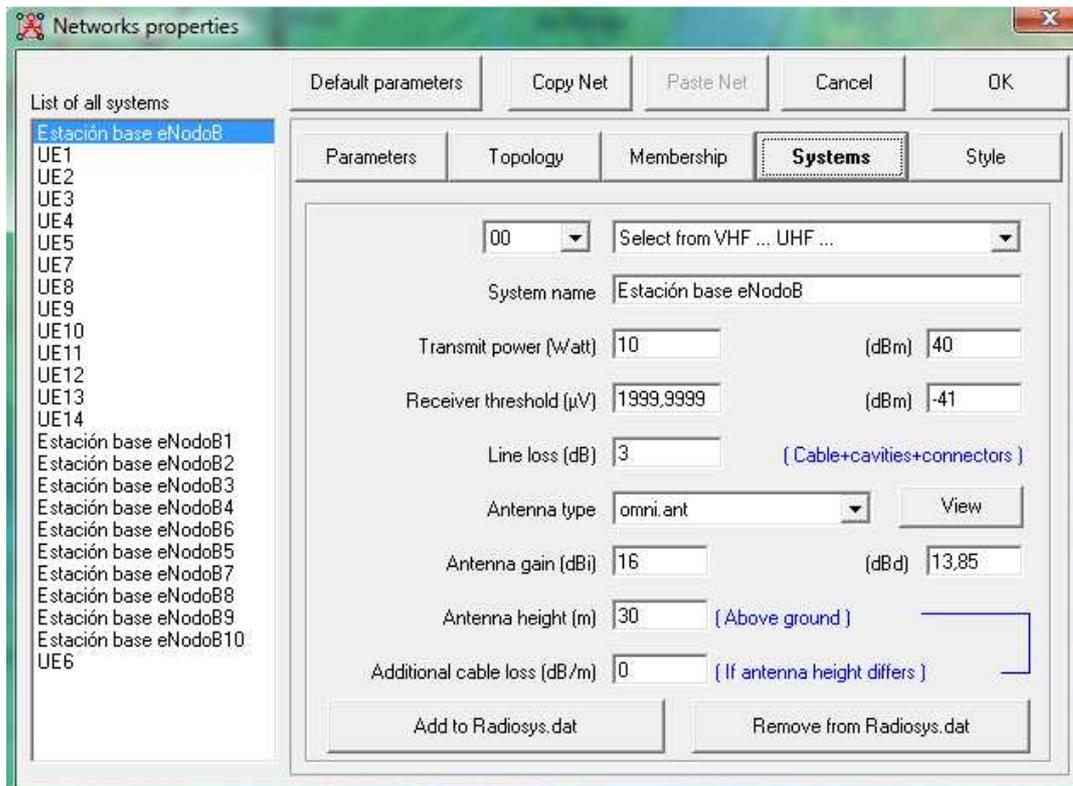


Figura 6-7: Parámetros para una estación Base

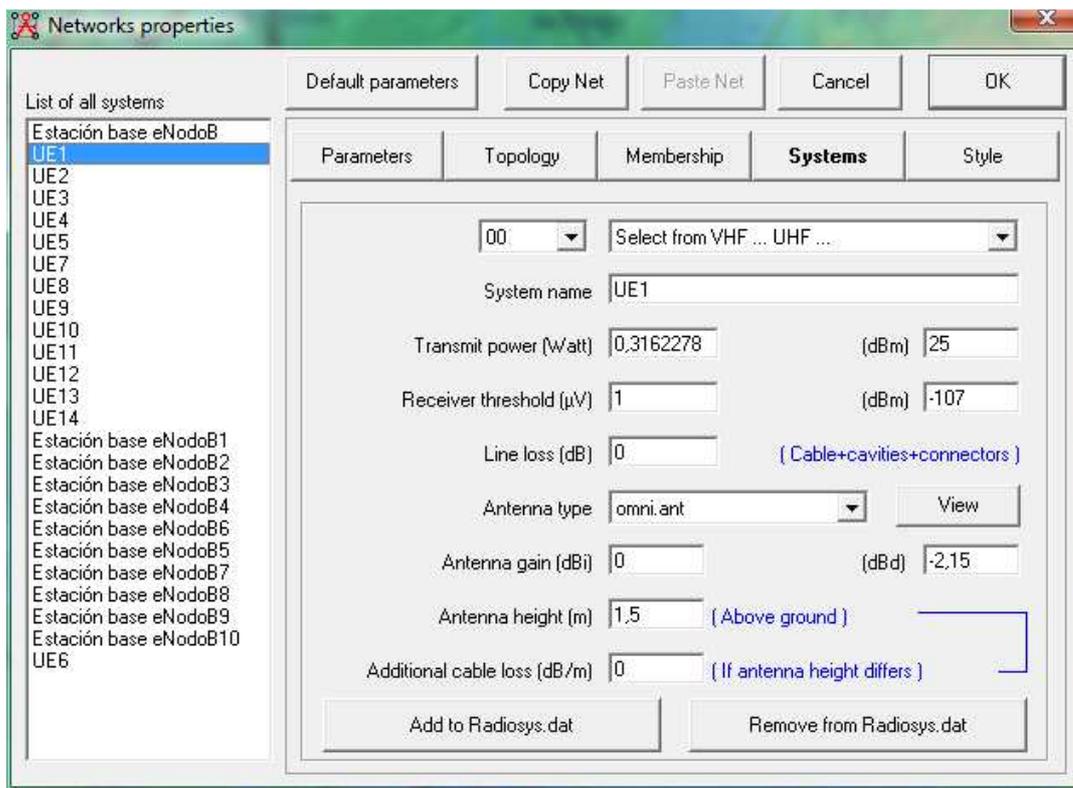


Figura 6-8: Parámetros del equipo de usuario



Una vez configurados los elementos de la red, se obtiene la Potencia Recibida de cada nodo en cada posición del UE.

Potencia recibida por UE2:

Nodo	Distancia (Km)	Potencia Rx UE2 (dBm)	Pérdidas Espacio Libre (dB)	Pérdidas Propagación (dB)
eNodoB4	3,73Km	-59,4	108,6dB	112,4
eNodoB1	4,97Km	-63,2	111,11dB	116,2
eNodoB2	2,10Km	-51,6	105,7	104,6
eNodoB3	8,37Km	-119,8	115,7	172,8
eNodo19	18,94Km	-116,9	122,8	169,9
eNodo20	10,04Km	-108,8	117,3	161,8
eNodo21	4,91Km	-57,2	111,0	110,2
eNodo22	13,53Km	-90,1	119,8	143,1
eNodo23	24,78Km	-125,0	125,1	178
eNodo24	23,46Km	-137,6	124,6	190,6
eNodoB	16,70Km	-106,5	121,7	159,5

Tabla 8: Potencia Recibida por un usuario

Si la Potencia recibida de un nodo está por debajo de la Sensibilidad=-112,43dBm, se considerará que ese nodo no es interferente. Este es el caso de eNodoB3, eNodo19, eNodo23 y eNodo24.

El nodo de servicio se corresponde con la mayor potencia recibida por UE2. En este caso es el nodo "eNodoB2".

Nodo	Distancia	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre	Pérdidas Propagación(dB)	Margen de Sensibilidad(dB)
eNodoB2	2,10Km	-51,6	105,7	104,6	55,4

Se toma la potencia recibida de los nodos interferentes, se pasa a miliwatios y se suma para obtener la potencia total de las interferentes. Este valor es -54.52dBm.

$$L_b = Pt_{eNB} + \Sigma G_j - \Sigma L_j - P_r \quad [6.12]$$

Si se sustituyen los valores anteriores se obtiene la relación Señal a Ruido&Interferencia

$$SINR = P_r - N + I \quad [6.13]$$

$$SINR = 0,92dB$$

El valor de la SINR en esta posición es bajo porque la potencia de las señales interferentes es elevada.

Se repite el análisis en cada una de las distintas posiciones de la carretera M-404. En el **Anexo** se encuentran los cálculos realizados anteriormente para cada ubicación del UE.



Figura 6-9: Posiciones de medida de la SINR

Los distintos usuarios son el UE2 en distintas posiciones a lo largo de la M-40 (Figura 6-9). Se muestra a continuación una tabla que contiene un resumen de los cálculos anteriores, La SINR se ha obtenido situado varios nodos aleatoriamente en las zonas de mayor elevación para que se puedan simular las señales interferentes.

La Tabla 9 muestra los valores de la SINR de nuevo y además se indica el nodo de servicio en cada posición y las pérdidas de propagación de la señal desde cada nodo de servicio:

Posiciones de UE2(Km) desde punto de partida M-404	SINR(dB)	Nodo de servicio	Distancia al nodo de servicio(Km)	Pérdidas de propagación (dB)
UE2=1,8	0,92	eNodoB2	2,10	104,6
UE3=5,3	4,08	eNodoB1	2,83	116,2
UE4=7	-0,826	eNodoB1	3,87	112,9
UE5=9	4,29	eNodoB3	2,64	110,1
UE6=10,8	34,87	eNodo21	5,64	118,8
UE7=13,1	14,13	eNodo22	2,5	104
UE8=14,2	9,11	eNodo22	1,62	111,2
UE9=15,6	-1,24	eNodo23	9,45	126,2
UE10=17	1,95	eNodo19	2,96	117,5
UE11=19,1	2,02	eNodo23	5,74	159,4
UE12=19,7	16	eNodoB	6,10	119,1
UE13=21,2	3,1	eNodo23	2,89	114,8
UE14=22,2	9,1	eNodo23	1,79	112
UE15=25	36,3	eNodo23	1,65	116,7

Tabla 9 : SINR

La Figura 6-10 muestra como varía la relación señal a ruido a medida que avanzamos por la carretera elegida para el estudio

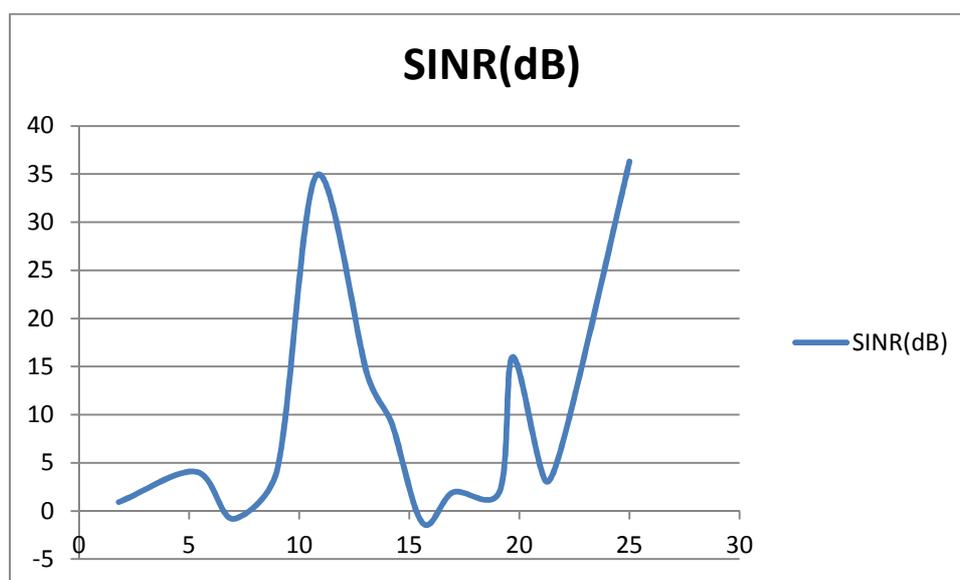


Figura 6-10: SINR vs. distancia



Se observa que a pesar de haber zonas donde la distancia entre nodos es mayor, las interferentes presentan una potencia elevada debido a que el perfil del terreno pueda ser más llano. Lo mismo sucede a la inversa.

Normalmente la relación señal a ruido e Interferencia disminuye a medida que nos alejamos del nodo. Si no se tratase de un entorno urbano, se hubiese obtenido una línea descendente a medida que aumenta la distancia. En este caso la SINR muestra un perfil irregular debido al relieve de la zona. Es una zona heterogénea topográficamente hablando.

El **eNodoB** se convierte en el Nodo de servicio en la posición UE12. Se encuentra a una distancia de 6,10Km. La potencia recibida es $Prx = -66,1dBm$. Esta potencia supera ampliamente el mínimo de sensibilidad fijado como objetivo. La SINR en esta posición es =16dB.

Se sabe que para que se establezca el radio enlace se tiene que cumplir que:

$$Prx = Si \quad [6.14]$$

$$Si = -174 + Fsis + 10\log w_i + NFR + 7 \times F^{-1}(0,75) + SINR = -174 + 4 + 10\log N^{\circ}RB + 10\log 180 \times 10^3 + SINR$$

$$-66,1 = -174 + Fsis + 10\log w_i + NFR + 7 \times F^{-1}(0,75) + SINR = -174 + 4 + 10\log N^{\circ}RB + 10\log 180 \times 10^3 + 16$$

$$N^{\circ}RB = 2,47 = 3$$

El mínimo número de RB es dos, por lo tanto se considerará la distancia entre este nodo y el usuario se considerará la distancia máxima, $d=6,10Km$ para este caso. La modulación a esta distancia será QPSK por tratarse de un punto alejado del nodo. El "throughput" será:

$$MI = 1,367 \frac{bits}{s} / Hz \quad [6.15]$$

$$\eta = \frac{1,367 \frac{bits}{s}}{Hz} \times 180KHz = 246,06Kbps$$

El nodo **eNodo23** se convierte en el nodo de servicio de cinco de las posiciones a estudiar. En este caso la máxima distancia en la que se convierte en el nodo de servicio no alcanza la SINR fijada como mínimo de servicio. En la posición UE13 la SINR=3,1dB y la distancia hasta el nodo es 2,89Km, En la posición UE15 la SINR =36,3dB y la distancia al nodo es 1,65Km. Para este nodo la distancia máxima sería 2,89Km y la mínima 1,65Km.

El nodo **eNodo22** se convierte en el nodo de servicio de dos de las posiciones a estudiar. En este caso la máxima distancia está en la posición UE7 donde la SINR=14,13dB y la distancia hasta el nodo es 2,5Km, En la posición UE8 la SINR =9,11dB y la distancia al nodo es 1,62Km. Para este nodo la distancia máxima sería 2,5Km y la mínima 1,62Km.



El nodo **eNodo19** se convierte en el nodo de servicio de una sola de las posiciones a estudiar UE10, alcanza el mínimo de SINR y la distancia al nodo es 2,96Km. El nodo **eNodo21** también proporciona cobertura a una sola posición UE6. El nodo **eNodoB2** es el nodo de servicio de la posición UE2 pero no llega al mínimo de servicio fijado.

El nodo **eNodoB1** se convierte en el nodo de servicio de cinco de las posiciones a estudiar. En este caso la máxima distancia en la que se convierte en el nodo de servicio no alcanza la SINR fijada como mínimo de servicio. En la posición UE4 la SINR=-0,86dB y la distancia hasta el nodo es 3,87Km pero la SINR no alcanza el mínimo fijado., En la posición UE3 la SINR =-4,08 y la distancia al nodo es 2,83. Para este nodo la distancia máxima sería 2,89Km y la mínima 1,65Km.

CONCLUSIONES TRAS LA SIMULACIÓN

Los Nodos que dan servicio son 6 a diferencia de los 11 que se propusieron en la primera fase de esta planificación, por lo tanto el despliegue se abarataría y la SINR mejoraría en todos los casos al haber menos interferentes.

En la Figura 6-11, que aparece a continuación se han rodeado con un círculo los nodos que darán servicio, obtenidos tras la simulación.



Figura 6-11 : RED LTE

La zona más accidentada, la que está en la parte derecha del plano requiere de más nodos para iluminar esta área mientras que la parte que está a la izquierda, más llana, con dos nodos cubre su área.

En cuanto a los radios de cobertura de cada nodo, no se podría establecer una red celular como en el caso de un entorno urbano homogéneo, los accidentes del relieve hacen variar los radios de cobertura debido a las pérdidas.

A priori y considerando los cálculos anteriores se podría decir que la **distancia máxima** entre el nodo y el usuario será 6,1Km, a esta distancia se alcanza el valor de la SINR mínima. A esta distancia se envían dos RB como máximo. El radio del hexágono sería $6,1/2=3,05\text{Km}$. Pero como ya se ha mencionado es imposible desplegar una red homogénea con el mismo radio de cobertura en todo el área.

6.1.7 DISEÑO DE LA RED

Realizada la simulación se puede observar que el planteamiento inicial de esta red estaba sobredimensionado. Los nodos que dan servicio son bastantes menos de los que se incluyeron en Radio Mobile para simular la red en la zona de estudio.

Los nodos que formaran parte de esta red son eNodoB, eNodoB2, eNodoB1, eNodoB3, eNodo19, eNodo21, eNodo22 y eNodo23. Ahora las señales interferentes serán menores y por lo tanto la SINR mejorará.

6.1.8 REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS

Las posibles interferencias serán causadas por la proximidad de otros nodos. En el caso que estamos estudiando consideraremos interferentes las que proporcionan mayor nivel de señal después del nodo de servicio. A las interferentes les asignaremos frecuencias distintas para evitar el solapamiento de las señales.

Como la disposición de los nodos se podría considerar “lineal”, se va a aplicar un modelo de reutilización de frecuencias SOFT FFR, con dos frecuencias solamente, ya que la distancias entre los nodos es suficiente para evitar interferencias.

La Figura 6-1 representa gráficamente el área de cobertura obtenida de la simulación de cobertura proporcionada por un nodo. En el primer caso se puede observar la cobertura de un nodo fuera de las zonas pobladas y en el segundo se observa lo mismo pero para el caso de las áreas con población.

Caso 1:

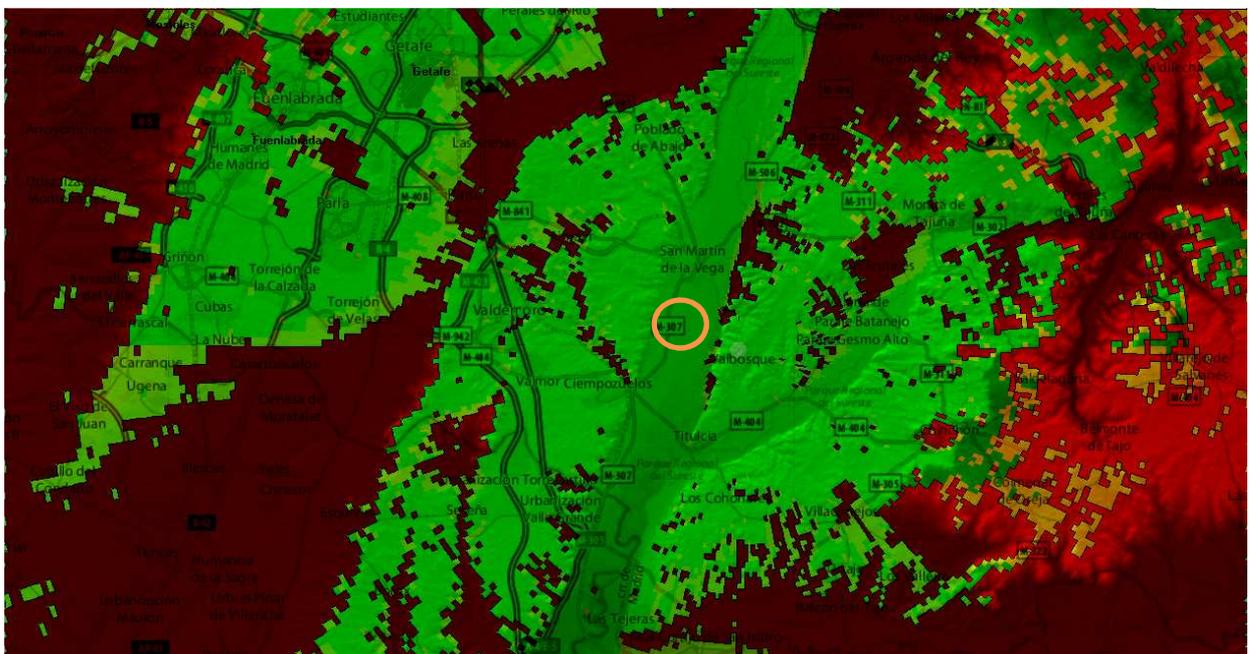


Figura 6-1: Radio de cobertura del nodo eNodo21

Este nodo presenta un área de cobertura amplia por lo tanto será interferente a otros.

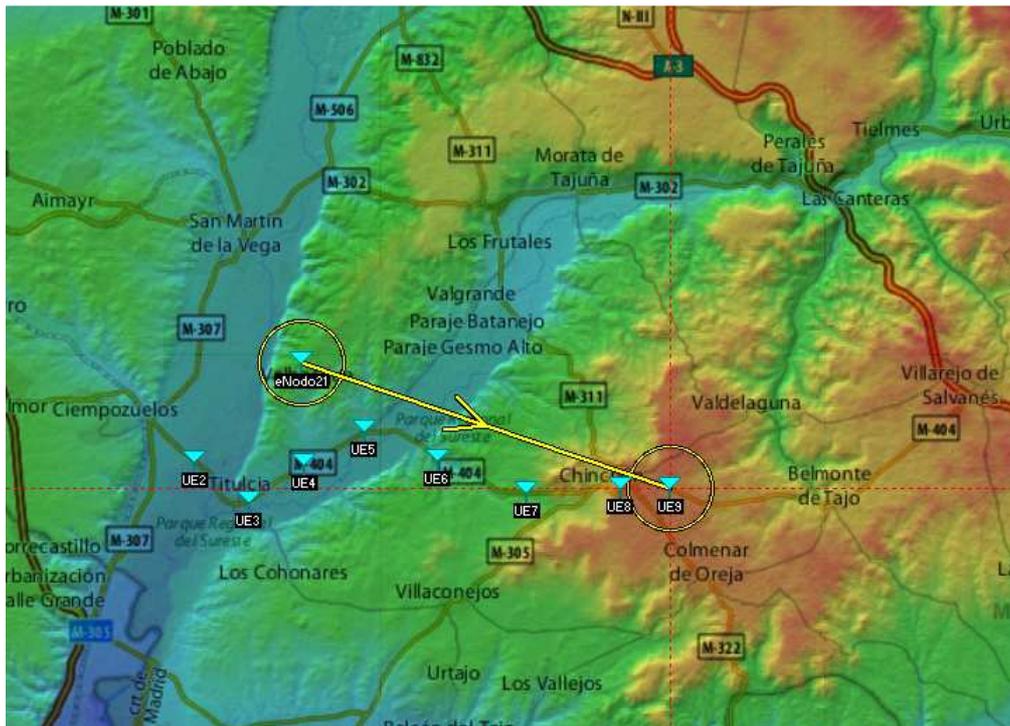


Figura 6-2: Alcance del nodo eNode21

El alcance del nodo eNode21 es amplio como muestra la Figura 6-2. Es la distancia máxima de servicio de este nodo.

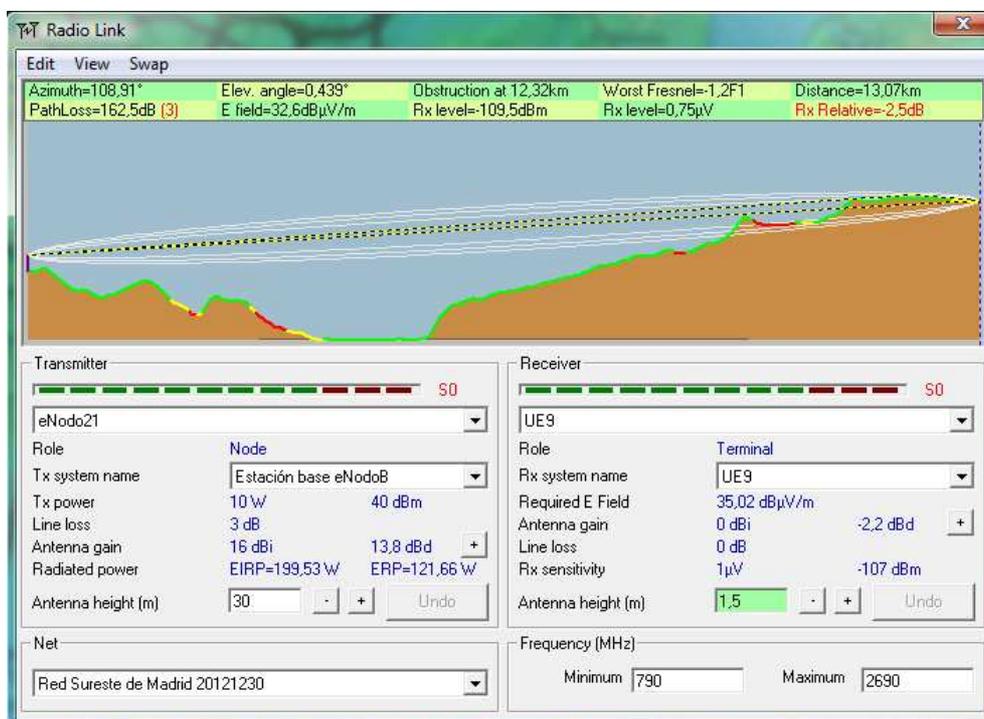


Figura 6-3: Parámetros del Radio Enlace



Se puede establecer la comunicación. La Figura 6-3 muestra el enlace en sentido descendente entre eNodo21 y UE9.

El área de cobertura del nodo eNodo21 es extensa, llega a cubrir prácticamente toda una zona rural no poblada, a pesar de esto y teniendo en cuenta el enlace ascendente es necesario colocar varios nodos más para llegar al nivel de señal deseado para cumplir los requisitos de QoS.

La última gráfica del **Caso1** demuestra que a la distancia a la que se encuentra el usuario UE9 no se establece el radio enlace. El parámetro Rx Relative=-2,5dB, que aparece en rojo significa que la señal no supera el umbral de sensibilidad del receptor, RX Sensivity:-107dBm.

En el caso del enlace ascendente sería el nodo eNodoB2 el que daría cobertura al usuario UE2. La Figura 6-4 representa el caso del radio enlace en sentido ascendente entre el eNodo21 y UE2. En este caso no se establece el enlace.

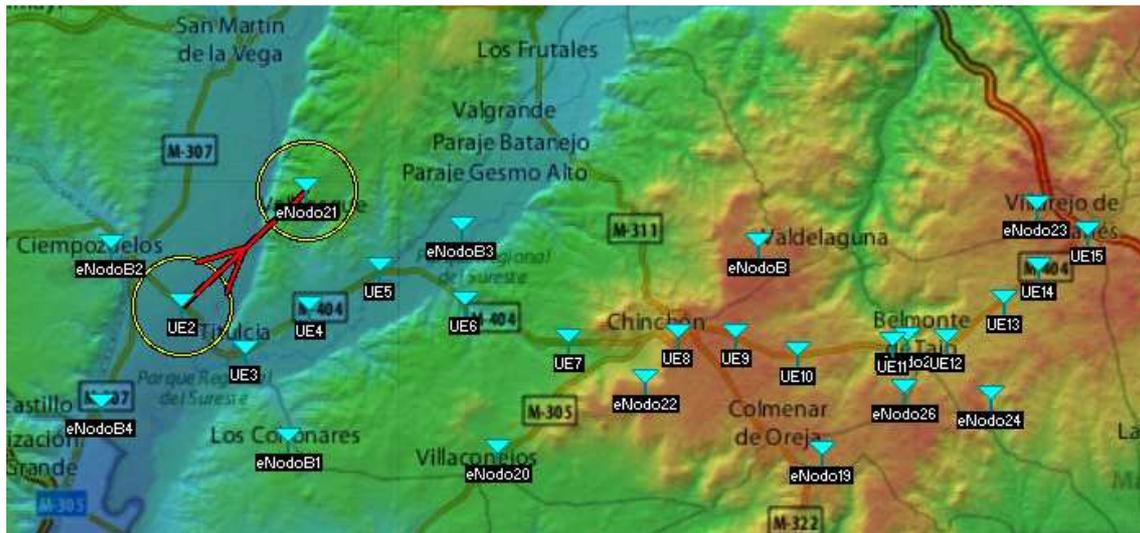


Figura 6-4: Enlace ascendente

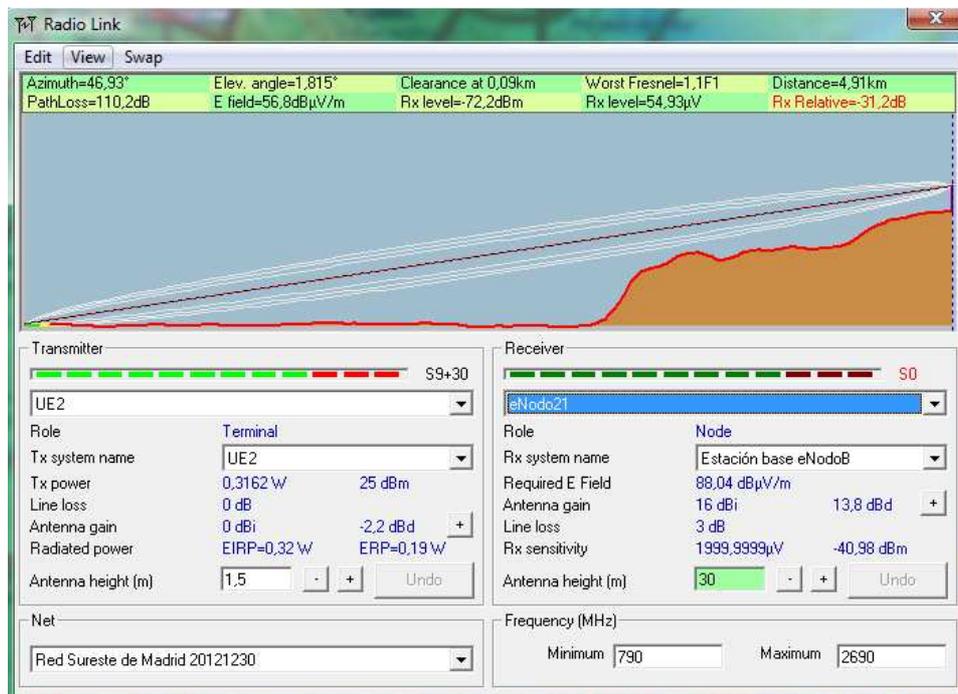


Figura 6-5: Parámetros del enlace

La Figura 6-5 presenta los parámetros del radioenlace y el perfil del mismo. La potencia recibida por el nodo -72,2 dBm no supera el nivel de sensibilidad de éste, - 40.98dBm.

En la Figura 6-6 se representa de nuevo un radioenlace con sentido ascendente pero en este caso entre el UE2 y el nodo eNodoB2:



Figura 6-6: Radioenlace establecido en sentido ascendente

A continuación, la figura 6-7 representa los parámetros que caracterizan el radioenlace:

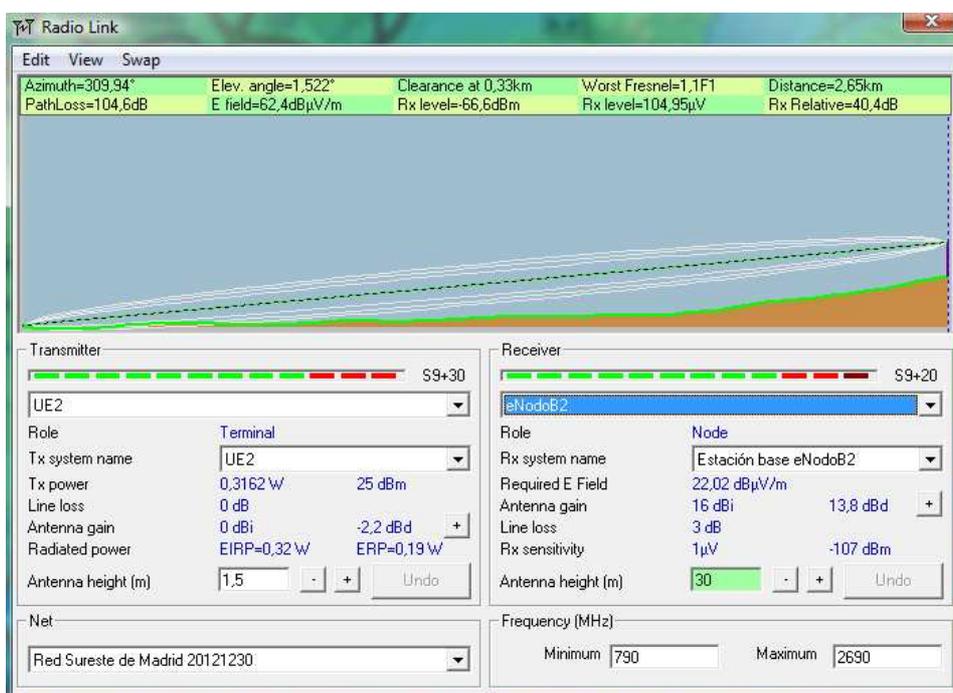


Figura 6-7: Parámetros del radioenlace

En este caso si queda establecido como se puede observar a través del parámetro margen de sensibilidad. La sensibilidad de la antena receptora del nodo es -107dBm , es superada por la potencia recibida que son $-66,6\text{dBm}$.

Caso 2

En este caso se va a realizar la simulación para un entorno rural con población:

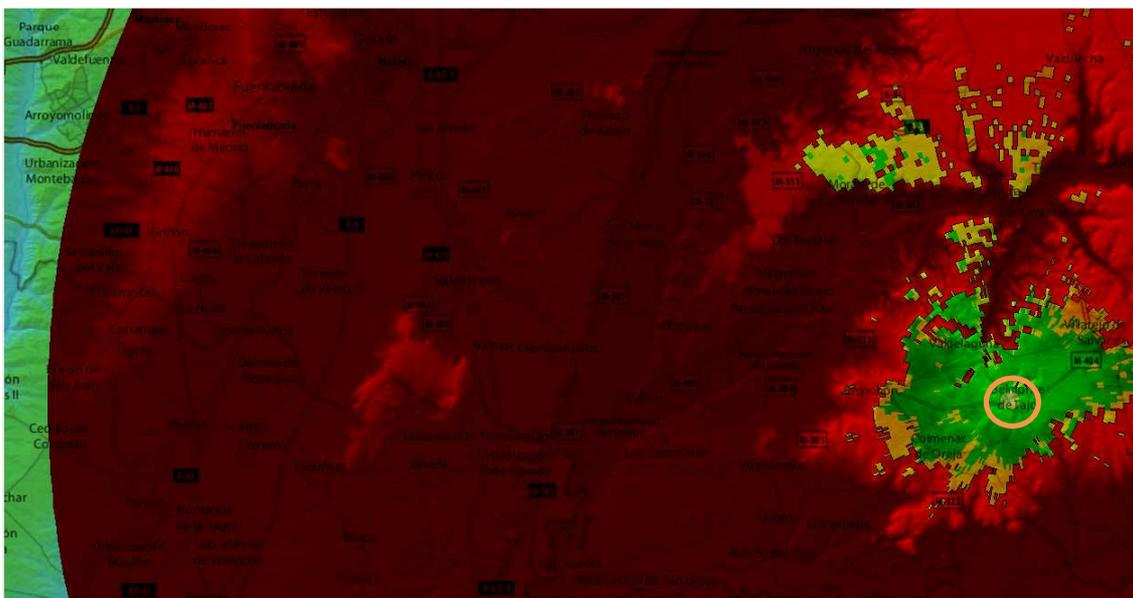


Figura 6-8: Radio de cobertura en un entorno rural con población.

La Figura 6-8 representa el área de cobertura del nodo eNodoB25. A la vista de la simulación, el área rural quedaría cubierta.

A continuación, la Figura 6-9 se simula el alcance del mismo, es decir, la máxima distancia en una determinada dirección, en la que se puede establecer un radioenlace.

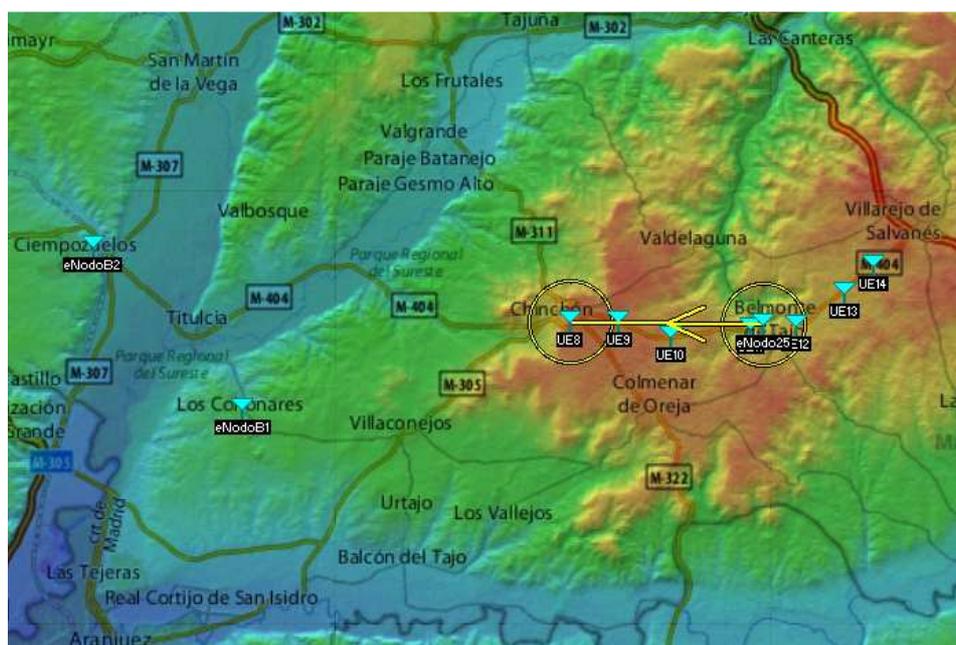


Figura 6-9: Alcance del nodo eNodo25

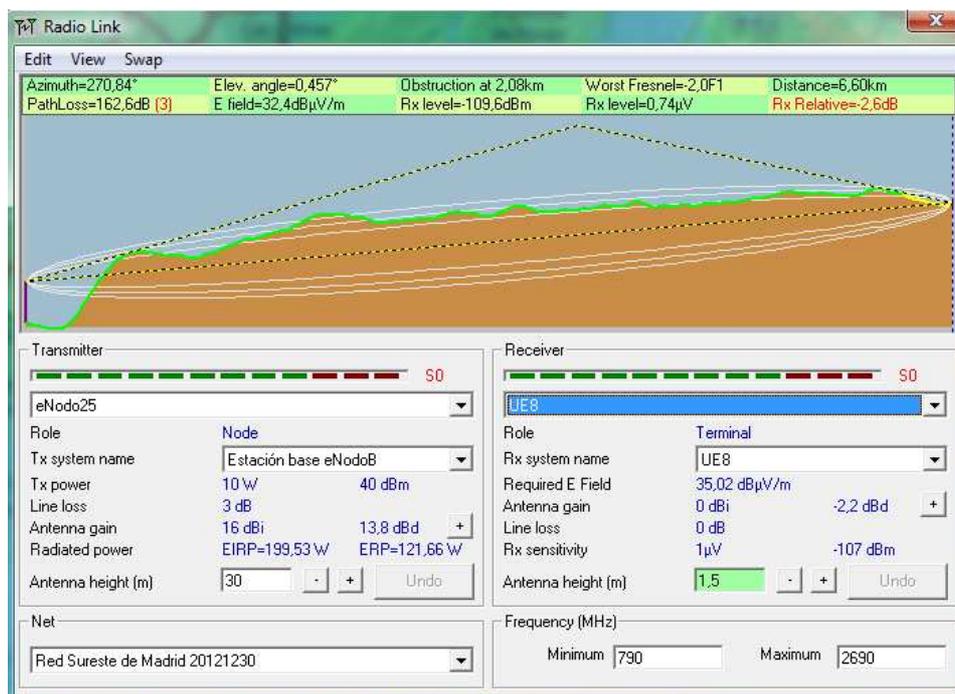


Figura 6-10: Simulación del radioenlace

El resultado de la simulación, representado en la Figura 6-10, es que se establece el radioenlace.

El área cubierta por este nodo no es extensa y la potencia proporcionada por el mismo no es elevada, por este motivo y teniendo en cuenta la densidad de población se ha añadido un nodo más en la población, en este caso Belmonte de Tajo. Este nodo es el nodo eNodo26. La Figura 6-11 representa su gráfico de cobertura sobre el plano de la zona.

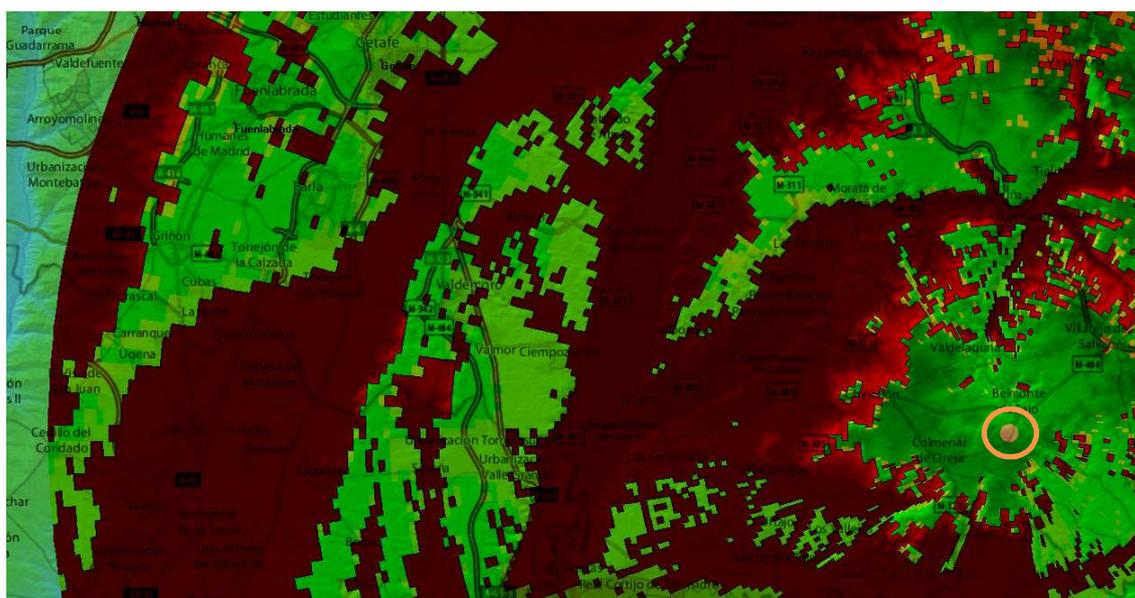


Figura 6-11: Radio de cobertura del nodo eNodo26.



En la Figura 6-10 se muestra como con este nuevo nodo quedaría cubierta la zona cumpliendo los requisitos de QoS esperados por los usuarios. Como se ha mencionado antes el radio celular sería menor debido a que la distancia entre nodos disminuye notablemente.

El enlace ascendente quedaría establecido, según los resultados de la simulación añadiendo un nuevo nodo en las proximidades de la posición de UE13.

En cualquier caso para realizar un despliegue eficaz sería necesario hacer un replanteo sobre la zona con un minucioso estudio topográfico.



7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto de fin de carrera ha sido estudiar las características de un entorno concreto para realizar el despliegue de una red radio LTE.

El estudio se ha centrado en el enlace descendente asumiendo que el duplexado es FDD con algunas pinceladas de lo que se debería tener en cuenta en el ascendente.

Para evaluar si la planificación es adecuada se ha llevado a cabo una simulación mediante el software Radio Mobile. Esta herramienta es utilizada por empresas para llevar a cabo planificaciones y despliegues de redes de comunicaciones reales. Es altamente fiable. Por mi experiencia profesional, puedo confirmar que se aplica en proyectos relacionados con seguridad como los sistemas de vigilancia de presas y costas (SIVE).

No se ha podido llevar a cabo el despliegue de la red siendo fiel a los cálculos, la topografía ha hecho que se tenga que aplicar un modelo de pérdidas Longley and Rice, pensado para su uso en computadores, por lo tanto la simulación ha sido clave para realizar el diseño.

El despliegue de una red LTE en un entorno rural al Sureste de Madrid presenta como principal inconveniente la ubicación de la estaciones base ya que la parte más alta de inversión corresponde a esta partida pues hay que tener en cuenta el relieve.

7.2 LÍNEAS FUTURAS

En este proyecto no se ha logrado encontrar una estrategia que permita describir de forma clara el comportamiento del tráfico. Se ha dedicado tiempo a encontrar una forma de describirlo por no ha sido posible.

Se podría ampliar el estudio de la estrategia de selección de nodos que se sigue en LTE y cómo se realiza el handover, si hay un tiempo mínimo en el que el usuario tiene que recibir una señal a una potencia determinada para afiliarse a otra base, etc. La selección del nodo de servicio se realiza en múltiples redes, así por ejemplo en las redes de comunicaciones privadas TETRA, el cambio de una base a otra es inmediato no hay tiempos de espera.



8 PRESUPUESTO

El despliegue de la red LTE en zonas rurales se realiza para dotar de cobertura 4G a todas las áreas pobladas y las que comprendidas entre ellas.

Para este despliegue se han presupuestado varias partidas de elementos que conforman estas redes, con alcance suficiente para lograr cumplir los requisitos de la calidad de servicio.

El coste de la red LTE para la zona de estudio es elevado. Esto supondría una gran inversión a realizar por parte de las empresas de comunicaciones. Se prevé un largo periodo de tiempo para amortizar la inversión.

A esta inversión hay que sumarle los gastos ocasionados por las licencias que debe conceder la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, Los ayuntamientos y los estudios relacionados con la prevención de riesgos para la salud.

De momento las compañías están instalando pilotos [31] de este sistema en algunas localidades.

A continuación se muestra el detalle de las partidas empleadas en el diseño de esta red:

Partida	Cantidad	Precio Unitario	Total (€)
Equipos LTE y sistema radiante			
Estación base eNodeB (HW y SW)	8	100.000€	800.000
Antenas	8	1200	9600
Radio Enlace	8	28000	22400
Infraestructura			
Sistema de protección contra rayos	8	500	4000
Sistema de puesta a Tierra	8	1400	11.200
Torres	8	2800	22.400
Instalación de los equipos	8	3000	24.400
Adquisición del Site y Obras	8	25000	200,000
Otros			
Permisos municipales y licencias	8	5000	40000
Margen de error	5%		67000
Total			1,401,960€

El coste de las estaciones base eNodeB están calculando con las estaciones de 3G incrementando en un 25% aproximadamente. LTE utiliza la configuración 2x2 MIMO, son dos antenas por cada sector, y al ser dos sectores por estación base, en total necesitan $4 \times 15 = 60$ antenas.



El incremento del tráfico de voz se refleja en el incremento de los ingresos del operador al facturarse por establecimiento de llamada y tiempo de ocupación de los recursos del sistema, en el caso del tráfico de datos se produce un desacoplo entre ambos, asociado a la adopción de tarifas planas.

El coste de despliegue y operación de las redes de comunicaciones móviles con la tecnología actual guarda cierta proporcionalidad con el volumen de tráfico a cursar si se pretende ofrecer una QoS adecuada, de manera que para preservar un cierto margen de beneficio es necesario reducir diferentes componentes de la estructura de costes, lo que constituye una de las principales motivaciones para el desarrollo de un sistema LTE.



9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Coude.(1997, Abril).Radio Mobile. Available: <http://www.cplus.org> [Online].
- [2] Tecnology & Strategy Consulting. Available: <http://www.chetansharma.com>. [Online].
- [3] 3GPP. Available: <http://www.3gpp.org/>. [Online].
- [4] 4GPortal. Available: <http://4g-portal.com/inter-cell-interference-coordination-icic>. [Online].
- [5] C. Johnson.(2010). Available:<http://www.lte-bullets.com>. [Online].
- [6] T. Farley. Available: http://www.telecomwriting.com/archive/TelenorPage_022-034.pdf. [Online].
- [7] A. Vochin. *History of Mobile Phones*, 2009, pp 1-5.
- [8] ETSI TR 136 912 V9.1.0..LTE;Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced). 2010, Enero.
- [9] 3GPP. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>,» [Online].
- [10] Available: <http://lteworld.org/lte-protocols-specifications>. [Online].
- [11] LTE Wolrd.Available: <https://www.elbauldprogramador.com> [Online].
- [12] M. Kim, Available: <http://arxiv.org/abs/1212.2291> [Online].
- [13] H. E. Shaer. *Interference Management in LTE-Advanced Heterogeneous Networks*.2012.
- [14] I. Poole. *Adrio Communications Ltd, Staines, UK«Cellular Communications Explained. From Basics to 3G., 2006.,»*
- [15] UCAN, *Contribución al desarrollo de herramientas esratégicas para el diseño dimensionado y evolución de las redes de telecomunicaciones de banda ancha*.
- [16] Leland, W. E., Taquq, M. S., Willinger, W., & Wilson, D. V. On the self-similar nature of Ethernet traffic. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Vol. 23, No. 4,). ACM. 1993, October.pp. 183-193.
- [17] R. M. D.K. Arrowsmith, *Modelling Network Data Traffic*, Londres.
- [18] R. Taute, *Modeling of Internet Traffic Data*.
- [19] D. R. Rivera, «Introduccion a los modelos de tráfico para redes de Banda Ancha,» *Universidad Politécnica de Cataluña*, 1998.
- [20] International Comunication Union. Available: <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/com13/ipexpert/ipmedia/71265-es.html>. [Online].
- [21] Universidad Carlos III.Available: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/PEst/tema4pe.pdf>. [Online].
- [22] 3GPP. Available: <http://www.rcrwireless.com/lte/lte-qos-3gpp.html>. [Online].
- [23] Available: http://keybridgeglobal.com/technology/path_loss/longley_rice.xhtml. [Online].



- [24] Telfneco. Available: www.telfneco.uy/propapagacion-ondas.pdf. [Online].
- [25] Imaging Systems. Available: www.ecrm.com/clase-4/propagacion.pdf [Online].
- [26] Narcís Cardona, Juan José Olmos, Mario García, "3GPP LTE HACIA 4G MÓVIL", Ed.: Marcombo.
- [27] K. C. J. Salo M. Nur-Alam, Informe de planificación radio para 3GPP
- [28] Shannon, Claude Elwood (1948). «A mathematical theory of communication». *Bell System Technical Journal* 27(379-423 and 623-656)C. Available: <http://docente.uco.mx/al021593/teorias.htm>. [Online].
- [29] LTE Quick Reference. Available: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_RSRP.html. [Online].
- [30] 3GPP. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/TDocExMtg--R1-70--29003.htm>. [Online].
- [31] Available: http://www.huawei.com/en/about-huawei/publications/communicate/hw-080990-hw_076557-23407-27509-hw_076568.htm. [Online].



10 ANEXO I

Cálculo de la SINR en cada posición:

Potencia recibida por UE3 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	4,43	-69,8	110,1	122,8
eNodoB1	2,83	-63,2	111,11	116,2
eNodoB2	4,9	-80,94	111,11	133,4
eNodoB3	7,18	-96,8	114,3	149,9
eNodo19	16,86	-120,5	121,7	173,5
eNodo20	7,81	-118,2	115,1	171,2
eNodo21	5,03	-90,2	111,2	143,2
eNodo22	11,54	-96,0	118,5	149
eNodo23	23,17	-120,1	124,5	173,1
eNodo24	21,59	-139,7	123,9	192,7
eNodoB	15,09	-76,1	120,8	129,1

El nodo de servicio en este caso sería eNodoB1.

No se consideraran nodos interferentes eNodo19, eNodo20, eNodo23 y eNodo24 por la misma razón mencionada en la posición de estudio anterior.

$$SINR = 4,8 \text{ dB}$$

Se continúa el estudio en la siguiente posición del mismo trazado:

Potencia recibida por UE4 (Nodo UE2 desplazado)

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación
eNodoB4	6,63	-78,1	113,6	131,1
eNodoB1	3,87	-59,9	109,	112,9
eNodoB2	5,98	-112,3	112,7	165,3
eNodoB3	4,96	-67,6	111,1	120,6
eNodo19	15,35	-121,0	120,9	174
eNodo20	6,83	-109,2	113,9	162,2
eNodo21	3,44	-55,5	108,5	108,5
eNodo22	9,90	-95,6	117,6	148,6
eNodo23	21,5	-119,2	123,7	172,2
eNodo24	19,79	-136,1	123,1	189,1
eNodoB	13,05	-76,1	119,5	129,1

El nodo de servicio sería eNodoB1. Los nodos eNodoB2, eNodo19, eNodo23, eNodo24 no se considerarán interferentes.

$$SINR = -0,826 \text{ dB}$$



Potencia recibida por UE5 (Nodo UE2 desplazado)

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	8,94	-79,6	116,2	132,6
eNodoB1	5,61	-68,2	112,2	121,2
eNodoB2	7,76	-115	115,0	168,0
eNodoB3	2,64	-57,1	105,6	110,1
eNodo19	8,94	-79,6	116,2	132,6
eNodo20	6,28	-113,3	113,2	166,3
eNodo21	3,14	-100,2	107,2	153,2
eNodo22	8,31	-62,6	115,6	115,6
eNodo23	19	-121	122,8	174
eNodo24	17,98	-134,8	122,3	187,8
eNodoB	10,92	-84,4	118	137,4

El nodo de servicio es eNodoB3. Los Nodos eNodoB2, eNodo20, eNodo23, eNodo24, no se consideran interferentes

$$SINR = 4.29dB$$

En este caso la SINR nos da un valor más elevado, se debe a que la potencia recibida de su nodo de servicio es notablemente mayor que la de los interferentes.

Potencia recibida por UE6 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación
eNodoB4	10,98	-128,9	117,9	181,9
eNodoB1	6,45	-123,6	113,4	176,6
eNodoB2	10,23	-125,4	117,6	178,4
eNodoB3	2,17	-108,7	103,9	161,7
eNodo19	11,6	-123,7	118,2	176,7
eNodo20	4,39	-110,7	110,1	163,7
eNodo21	5,64	-65,8	112,2	118,8
eNodo22	5,66	-100,7	112,3	154,7
eNodo23	16,07	-134,9	121,7	187,9
eNodo24	15,39	-133,8	121	186,8
eNodoB	8,61	-118,5	115,9	171,5

El nodo de servicio en esta nueva ubicación es eNodo21. En esta posición la SINR es mucho mayor debido a que sólo hay dos interferentes y la diferencia de señal recibida del nodo de servicio en relación a los interferentes es muy elevada.

$$SINR = 34.87dB$$



Potencia recibida por UE7 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	6,14	-128,5	113	181,5
eNodoB1	8,56	-101,6	115,9	154,6
eNodoB2	13,44	-71,8	119,8	124,8
eNodoB3	4,47	-101,1	110,2	154,1
eNodo19	8	-116,1	115,3	169,1
eNodo20	3,79	-82,2	108,8	135,2
eNodo21	8,73	-66,3	116	119,3
eNodo22	2,5	-51	105,2	104
eNodo23	14,03	-135,1	120,2	188,1
eNodo24	12,28	-133,4	119	186,4
eNodoB	6,41	-128,5	113	181,5

En este caso el nodo de servicio es el eNodo22

$$SINR = 14,13dB$$

La SINR toma un valor elevado. La potencia recibida de las interferentes no supera la señal del nodo de servicio

Potencia recibida por UE8 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	16,73	-77,1	121,7	130,1
eNodoB1	11,63	-80,6	118,5	133,6
eNodoB2	16,53	-106,5	121,6	159,5
eNodoB3	6,96	-110,8	114,1	163,8
eNodo19	5,36	-86,9	111,8	139,9
eNodo20	6,18	-107	113	160
eNodo21	11,52	-98,1	118,4	151,1
eNodo22	1,62	-58,2	101,4	111,2
eNodo23	10,98	-104,8	118	157,8
eNodo24	9,19	-118,0	116,5	171
eNodoB	3,51	-68,1	108,1	121,1

El nodo de servicio en este caso es eNodoB22.

$$SINR = 9,11dB$$



Potencia recibida por UE9 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	18,37	-119	122,5	172
eNodoB1	13,23	-116,7	119,6	169,7
eNodoB2	18,16	-115,7	122,4	168,7
eNodoB3	8,47	-116,1	115,8	169,1
eNodo19	4,22	-73,9	109,7	126,9
eNodo20	7,62	-114,6	114,8	167,6
eNodo21	13,07	-109,5	119,5	162,5
eNodo22	2,91	-82	106,5	135
eNodo23	9,45	-73,2	116,7	126,2
eNodo24	7,54	-113,1	114,8	166,1
eNodoB	2,72	-78,2	105,9	131,2

El nodo de servicio es en este caso eNodo23.

$$SINR = -1,24dB$$

Las interferentes en esta posición vuelven a superar a la señal.

Potencia recibida por UE10 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	20,10	-123,2	123,3	176,2
eNodoB1	14,88	-119,7	120,7	172,7
eNodoB2	20,1	-121,4	123,2	174,4
eNodoB3	10,33	-123,5	117,5	176,5
eNodo19	2,96	-64,5	106,6	117,5
eNodo20	9,08	-122,1	116,4	175,1
eNodo21	14,93	-118,1	120,7	171,1
eNodo22	4,46	-93,4	110,2	146,4
eNodo23	8,09	-72,4	115,4	125,4
eNodo24	5,71	-111,6	112,3	164,6
eNodoB	3,34	-68	-107,7	121

El nodo de servicio eNodo19.

$$SINR = 2,14dB$$



Potencia recibida por UE11 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	22,85	-154,2	124,4	207,2
eNodoB1	17,63	-147,7	122,1	200,7
eNodoB2	22,68	-151,7	124,3	204,7
eNodoB3	12,85	-139,2	119,4	192,2
eNodo19	3,76	-111,1	108,7	164,1
eNodo20	11,79	-138,8	118,6	191,8
eNodo21	17,47	-145,5	122,1	198,4
eNodo22	7,20	-133	114,4	186
eNodo23	5,74	-106,4	112,4	159,4
eNodo24	2,76	-111,8	107,4	161,7
eNodoB	4,82	-122	110,9	175

$$SINR = 2,02 \text{ dB}$$

Se recibe señal del nodo eNodo23

Potencia recibida por UE12 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	24,41	-124,6	125	177,6
eNodoB1	19,18	-124,5	122,9	177,5
eNodoB2	24,21	-121,6	124,9	174,6
eNodoB3	14,34	-127,3	120,3	180,3
eNodo19	4,84	-89,5	110,9	142,5
eNodo20	13,32	-125,8	119,7	178,8
eNodo21	18,96	-117,2	122,8	170,2
eNodo22	8,76	-99,7	116,1	152,7
eNodo23	4,66	-83,4	110,6	136,4
eNodo24	2,09	-102,9	103,6	155,9
eNodoB	6,10	-66,1	112,9	119,1

El nodo de servicio es eNodoB

$$SINR = 16 \text{ dB}$$



Potencia recibida por UE13 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	26,17	-120,2	125,6	173,2
eNodoB1	21	-117,7	123,7	170,7
eNodoB2	25,76	-118,8	125,4	171,8
eNodoB3	15,76	-126,7	121,2	179,7
eNodo19	6,83	-67	113,9	120
eNodo20	15,21	-126	120,9	179
eNodo21	20,36	-113,6	123,4	166,6
eNodo22	10,59	-85,9	117,7	138,9
eNodo23	2,89	-61,8	106,4	114,8
eNodo24	2,81	-95,4	106,2	148,4
eNodoB	7,27	-69,2	114,4	122,2

El nodo de servicio es el eNodo23

$$SINR = 3,1dB$$

Potencia recibida por UE14 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	27,27	-121	125,9	174
eNodoB1	22,16	-116,9	124,1	169,9
eNodoB2	26,71	-118,1	125,7	171,1
eNodoB3	16,65	-127,2	121,6	180,2
eNodo19	8,20	-76,5	115,5	129,5
eNodo20	16,44	-126,1	121,5	179,1
eNodo21	21,21	113,8	123,7	166,8
eNodo22	11,78	-85,8	118,6	138,8
eNodo23	1,79	-59	102,3	112
eNodo24	3,97	-96,1	109,2	149,1
eNodoB	8,10	-69,5	115,4	122,5

El nodo de servicio es el eNodo23

$$SINR = 9,1dB$$



Potencia recibida por UE15 (Nodo UE2 desplazado):

Nodo	Distancia(Km)	Potencia Rx UE2(dBm)	Pérdidas Espacio Libre(dB)	Pérdidas Propagación(dB)
eNodoB4	28,83	-137,1	126,4	190,1
eNodoB1	23,79	-133	124,7	186
eNodoB2	28,12	-132,7	126,2	185,7
eNodoB3	18,02	-132,6	122,3	185,6
eNodo19	9,95	-114,9	117,2	167,9
eNodo20	18,12	-134,2	122,4	187,2
eNodo21	22,54	-128	124,3	181
eNodo22	13,44	-119,5	119,8	172,5
eNodo23	1,65	-63,7	101,5	116,7
eNodo24	5,52	-100	112	157,6
eNodoB	9,49	-111,6	116,8	164,6

El nodo de servicio es el eNodo23

$$SINR = 36,3dB$$



11 ANEXO II

11.1 RADIO MOBILE

La herramienta software que se utiliza en este proyecto, es Radio Mobile, como ya se ha mencionado anteriormente. Es un software de distribución gratuita, disponible en Radio Mobile <http://www.cplus.org/rmw>

Este programa utiliza perfiles geográficos de la zona de trabajo combinados con la información de los equipos (potencia, sensibilidad del receptor, características de las antenas, pérdidas, etc.) que se desea simular.

Radio Mobile posee múltiples utilidades de apoyo para la simulación de los enlaces y para el diseño de equipos y del sistema de telecomunicaciones.

Los parámetros a introducir para realizar las simulaciones permiten reflejar los equipos reales que se piensa utilizar en la instalación para la que están destinados. Para el diseño específico de enlaces de radio se utiliza un modelo punto a punto.

11.1.1 CONCEPTOS RADIO MOBILE

Unidad: Se refiere a las terminales pertenecientes a la red. Es decir, las unidades Unidad 1, Unidad 2,..., Unidad N contiene las coordenadas de los terminales entre los que se establecen los enlaces. Para que resulte sencillo trabajar con ellas, se pueden incluir iconos, el nombre del lugar real, etc.

Red: Se refiere a la información de la red. Los enlaces establecidos, los equipos de transmisión y recepción, etc.

Sistemas: Se refiere al sistema que guardará la información de los equipos que se quiere simular en una unidad. Por ejemplo, un Sistema 1 genérico tiene una antena situada a 12 m de altura, un transmisor de 200 mW con receptor de sensibilidad 93 dBm, pérdidas de los conectores para sus equipos de 3 dB, etc. Este sistema a la hora de diseñar la red, se puede asociar a una Unidad para que en ese lugar se simule que están funcionando equipos con esas características.

11.1.1.1 Ficheros

En Radio Mobile existen varios tipos de ficheros que guardan para una misma red diferente tipos de información. Es importante entender que RadioMobile necesita cargar mapas sobre las



locaciones para la simulación, de lo contrario no funcionará. Para entender dicho proceso, se mencionan los siguientes ficheros:

Ficheros.map: Son los ficheros que contienen la elevación de los mapas. Es la base con la que se cargan los perfiles del terreno.

Ficheros.bmp: Son los ficheros que contienen imágenes (imágenes de los mapas asociados a las elevaciones y otro tipo de mapas).

Ficheros.net: Son los ficheros que guardan la información de la red diseñada (unidades, redes, equipos, enlaces establecidos, etc.).

La ventana de inicio de Radio Mobile es la Figura 11-1:

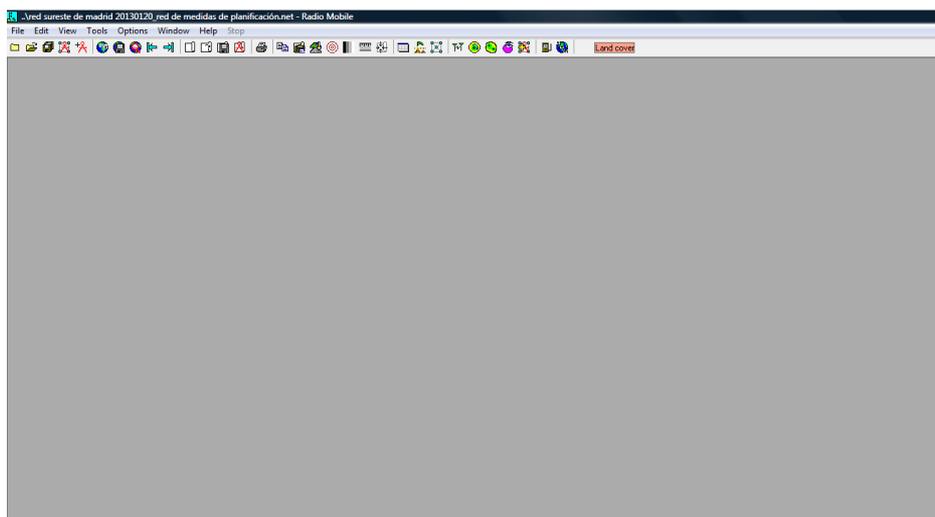


Figura 11-1: Ventana de inicio de Radio Mobile

11.1.1.2 CONFIGURACIÓN DE LA RED

En el menú archivo aparece la opción “Nuevas Redes” para crear una nueva red.

Para la inicialización de la red con la que se va a trabajar, se tiene que introducir el número de redes (enlace o cadena de enlaces), número de unidades y número de sistemas de las que se quiere disponer. Con estos datos el programa estima la cantidad de memoria necesaria. Los números límites son: 50 redes, 1000 unidades y 255 sistemas.

Para cargar los datos en la red, en el menú Archivo se selecciona la opción “Propiedades de las redes” y el programa lanza la ventana de configuración.

Se elige el tipo de red, que en este caso es Red de Datos Cluster (Nodo/Terminal).

Parámetros de la red:

Miembros: Define el número de terminales pertenecientes a la red, así como sus sistemas y su papel dentro de esta según la topología.

Sistema: Define los equipos utilizados en el enlace. En esta sección se definen las características del equipo a utilizar (potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, pérdida de la línea, tipo de antena, altura de la antena, ganancia de la antena y pérdidas adicionales del cable).

Estilo: Define cómo se quiere que se presenten los resultados.

La simulación de un enlace radio presenta la información en el formato de la siguiente imagen de la Figura 11-2:

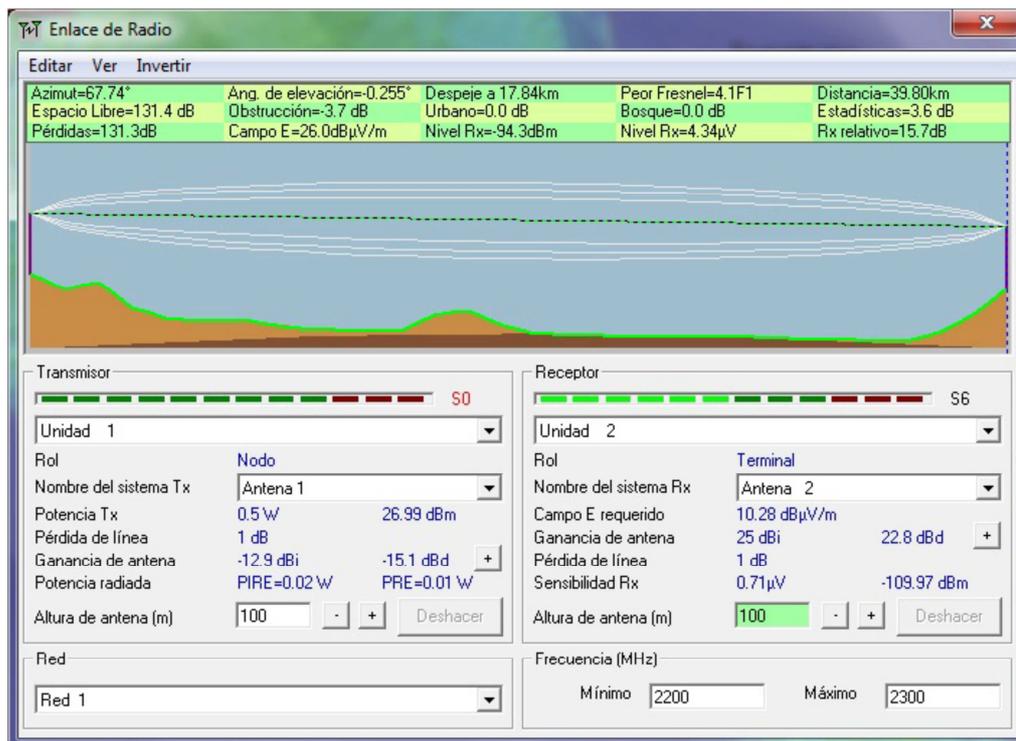


Figura 11-2: Resultado de la simulación

En la imagen superior se presentan los resultados radio eléctricos de propagación:

Azimuth y Elevación con que está orientada la antena transmisora Tx= 101.52° y -0.283° respectivamente.

Pérdidas por espacio libre = 137.7 dB



Distancia del enlace = 50.87 Km

Peor ángulo de Fresnel para este trayecto = 7.8F1

En particular y más importante parámetro es **Nivel Rx en dBm**, el cual permite conocer el valor de la potencia recibida en el receptor Rx. Además se muestra el parámetro **Rx relativo** que permite conocer el margen, respecto a la sensibilidad del receptor, con que llega la potencia recibida; este valor se muestra de color negro cuando hay comunicación y de color rojo cuando (de acuerdo al criterio de -3dB) no hay recepción adecuada. En este caso la potencia recibida es de -86.7 dBm con un margen de 14.3 dB.

