

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
COMUNICACIÓN



**Evaluación del suelo de ruido por interferencia  
cocanal para la planificación LTE**

**AUTOR:** Javier de Tomás Villamayor

**TUTOR:** Ángel María Bravo Santos

2 de Octubre de 2014



TÍTULO: EVALUACIÓN DEL SUELO DE RUIDO POR INTERFERENCIA COCANAL PARA LA PLANIFICACIÓN LTE.

AUTOR: *Javier de Tomás Villamayor*

TUTOR: *Ángel María Bravo Santos*

La defensa del presente Trabajo Fin de Grado se realizó el día 2 de Octubre de 2014 en Leganés, siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE:

SECRETARIO:

VOCAL:

Habiendo obtenido la siguiente calificación:



# AGRADECIMIENTOS

*A mis padres y hermano:*

*Gracias por creer siempre en mí, por apoyarme y por no darme siempre lo que quise. Me enseñaron el valor de las cosas, y por eso me han dado fuerzas para luchar por ellas.*

*Quiero agradecerle todo el apoyo a mi familia, sobre todo el de mis abuelos, puesto que estén donde estén, sin su ayuda no hubiera podido sacarlo adelante.*

*Gracias a todos aquellos que me han ayudado a sacar esta etapa de mi vida adelante, en concreto a mi novia, compañeros convertidos en amigos de la universidad y amigos tanto de Madrid como de Aranjuez.*

*Para terminar y no por ello menos importante, a mi tutor Ángel María, cuya colaboración en este trabajo fin de grado ha sido determinante, además de su buena disposición en todo momento y mejor aún su simpatía y su tiempo.*

*“Nuestra recompensa se encuentra  
en el esfuerzo y no en el resultado.  
Un esfuerzo total es una victoria  
completa”*

*Mahatma Gandhi*



*El siguiente documento cuenta con la siguiente estructura:*

- 1. Resumen del trabajo fin de grado.*
- 2. Introducción y origen de las comunicaciones móviles.*
- 3. Exposición de las características del sistema de comunicaciones estudiado.*
- 4. Especificaciones sobre el tema a estudiar.*
- 5. Estado del arte.*
- 6. Exposición de los resultados de la investigación.*
- 7. Conclusiones sacadas del estudio, líneas de investigación futuras y retos superados.*
- 8. División del tiempo empleado y recursos económicos necesarios para el desarrollo del trabajo.*

## Resumen

En este trabajo se ha tratado de estudiar el comportamiento por el cual se rige el sistema de comunicación basado en LTE (Long Term Evolution) mediante la exposición de su evolución y explicando algunas de sus características principales, haciendo más énfasis en aquellas que han hecho de este sistema una gran novedad frente a los anteriores. También hablaremos de su arquitectura y de las funcionalidades de cada uno de los componentes que lo forman.

En el estudio se profundiza en el concepto de interferencia, cómo surge, cómo se combate y cuáles son las mejores propuestas para poder evitarlo lo máximo posible.

Dedicaremos parte del TFG al estudio de las distintas estrategias que se pueden encontrar en cuanto a la reutilización de frecuencias, para de este modo poder llegar a una conclusión de cual es mejor en cada caso para obtener una transmisión de mayor calidad.

Además, este trabajo se centra también en la creación de un escenario particular en el cual se estudia el comportamiento de la SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) tanto en el enlace ascendente como descendente. En esta simulación hemos utilizado la herramienta de software MATLAB (MATrix LABoratory) para poder generar gráficas y escenarios en los cuales situamos los móviles, tanto el móvil del usuario a transmitir como los de los interferentes que hacen que esa transmisión no sea perfecta. En las celdas interferentes añadimos parte de aleatoriedad, para intentar simular la mayor realidad posible. Teniendo en cuenta en todo momento condiciones reales de transmisión con respecto a factores influyentes en el día a día.

En cuanto a la simulación destacamos la diferenciación entre el sentido ascendente y el descendente. En el sentido ascendente generamos seis móviles interferentes en posiciones aleatorias para poder ir generando los distintos valores de SINR dependiendo de las distancias tanto del usuario como de los interferentes.

En referencia al sentido descendente, destacamos la posición y las formas de los trisectores en los cuales calculamos el valor de SINR entre celdas con el mismo sector y después con los otros dos sectores restantes. Además, vamos a ir variando la posición del móvil desde el borde de la celda hacia el centro que en teoría obtendremos mejor valor de SINR (en efecto, ocurre de este modo).

Como resultados obtenemos que se llegue a cumplir lo esperado por teoría, a menor distancia entre los móviles mejor SINR al igual que cuanto más cerca se encuentre el usuario del centro de la celda será mayor también el valor de la SINR y por ello la comunicación será de mayor calidad.

## Abstract

The aim of this paper is the study of the functioning on which the communication system Long Term Evolution (LTE) is based. In comparison to previous communication systems, LTE has reached a great success because of its characteristics and evolution. In addition, LTE system architecture is examined in terms of its functionalities and elements which have led this system to stir mobile communication systems up.

This paper deals with an in-depth analysis of the term interference. As a result of the research, this paper illustrates how it is originated and provides the most effective proposals to avoid interferences as much as possible.

In reference to the reuse of frequencies, a variety of strategies are investigated so as to determine which method allows obtaining a better signal quality.

Furthermore, this paper has focused on the creation of a particular scenario which studies the functioning of the Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) both with the uplink and downlink. This simulation has been employed the software MATLAB (MATrix LABoratory) in order to generate graphics and scenarios where mobiles are situated, both the UE (User Equipment) and mobile interferents. In order to recreate a simulation closed to reality, inter-cells are randomly added taking into account daily factors which affect real transmissions.

In what simulation is concerned, it must be highlighted a distinction between uplink and downlink. Concretely, in UL six interferent mobiles have been generated in random positions to create the different values of SINR, depending on the distance both the user and the interferents.

In relation to the DL, it has been remarked position and forms of the tri-sectors in which the value of SINR is calculated. Firstly, this value is calculated among cells with the same sector then the other two sectors are also calculated. Additionally, the mobile position is going to be modified along the investigation from the border to the centre of the cell, because of the fact this change is theoretically believed to engender a better value of SINR. In fact, it has been demonstrated that this modification entails more efficient results.

As a consequence of this research, the smallest is the distance between the user and the centre of the cell, the biggest the value of SINR will be. Hence, the communication will achieve a higher quality level.

# Índice

Índice de Figuras .....	12
Lista de Acrónimos .....	14
Introducción al Sistema LTE .....	17
Conceptos de Despliegue de una Red LTE y Arquitectura .....	20
Arquitectura e-UTRAN.....	22
Arquitectura EPC .....	23
Zona 1.....	23
Zona 2.....	24
Zona 3.....	24
Características Principales del Sistema LTE.....	25
Características Destacadas del Sistema LTE.....	28
Control de Interferencia y de Potencia .....	35
Control de potencia.....	35
Planificador semi-persistente.....	36
Adaptación dinámica del enlace .....	38
Interferencia dentro de los equipos móviles .....	40
Indicadores de interferencia y estrategias ICIC en downlink.....	44
Indicadores de interferencia y estrategias ICIC en uplink.....	49
Otras técnicas de mitigación de interferencia intercelular.....	50
Partial pathloss compensation.....	50
Acceso por división espacial.....	50
Modelos de propagación y parámetros de simulación.....	52
Modelo Log-Normal .....	52
Modelo ITU P.1411.....	53
Modelo ITU-R P.1238 .....	54
Modelo Cost231 – Okumura Hata.....	55
Estudio y Definición de las Reglas de Planificación.....	56
Sentido UL .....	61
Modelo no sectorizado .....	63
Modelo sectorizado.....	65
Sentido DL .....	67

## Evaluación del suelo de ruido por interferencia cocanal para la planificación LTE

---

Modelo no sectorizado .....	69
Modelo sectorizado.....	72
Conclusiones .....	74
Conclusiones generales.....	74
Líneas de investigación futura.....	77
Retos superados.....	78
Gestión del Proyecto.....	79
Presupuesto .....	80
Opinión Personal .....	82
Bibliografía .....	83

# Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Evolución de los sistemas móviles. ....	17
<b>Figura 2:</b> Estandarización. ....	18
<b>Figura 3:</b> Sistemas móviles celulares 3G/4G. ....	18
<b>Figura 4:</b> Arquitectura EPS. ....	20
<b>Figura 5:</b> Arquitectura e-UTRAN. ....	22
<b>Figura 6:</b> Arquitectura EPC. ....	23
<b>Figura 7:</b> Modelos de modulación seguidos en LTE. ....	26
<b>Figura 8:</b> Resumen de parámetros LTE. ....	27
<b>Figura 9:</b> Representación del modo de uso del método de acceso OFDMA. ....	28
<b>Figura 10:</b> Estructura de trama con prefijo cíclico normal.....	29
<b>Figura 11:</b> Estructura de trama con prefijo cíclico extendido.....	30
<b>Figura 12:</b> Conceptos SC y OFDM.....	30
<b>Figura 13:</b> Concepto técnica MIMO. ....	31
<b>Figura 14:</b> Modo de empleo de las femtoceldas.....	32
<b>Figura 15:</b> Despliegue de las femtoceldas.....	34
<b>Figura 16:</b> Conexión entre protocolo IP y el sistema LTE.....	34
<b>Figura 17:</b> Estructura de la interfaz radio. ....	37
<b>Figura 18:</b> Concepto de variaciones de tasas.....	38
<b>Figura 19:</b> Esquema de las funcionalidades del sistema ICIC.....	41
<b>Figura 20:</b> Funcionamiento de los agentes de interferencia. ....	43
<b>Figura 21:</b> Posibles esquemas de reuso de frecuencias a través de ICIC.....	44
<b>Figura 22:</b> Modelo FRF 1 de estrategias de reuso de frecuencias. ....	45
<b>Figura 23:</b> Modelo FRF 3 de reuso de frecuencias. ....	46
<b>Figura 24:</b> Modelo PRF de reuso de frecuencias.....	47
<b>Figura 25:</b> Modelo SR de reuso de frecuencias.....	48
<b>Figura 26:</b> Parámetros modelo Log-Normal.....	52
<b>Figura 27:</b> Modelo de reutilización empleado para el estudio, FRF 1. ....	56
<b>Figura 28:</b> Medidas de referencia tanto para la colocación del UE como de los interferentes..	57
<b>Figura 29:</b> Representación del escenario creado para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace ascendente. ....	61
<b>Figura 30:</b> Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido ascendente en el modelo no sectorizado. ....	63
<b>Figura 31:</b> Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace ascendente en el modelo no sectorizado.....	64
<b>Figura 32:</b> Escenario del modelo sectorizado en el enlace ascendente. ....	65
<b>Figura 33:</b> Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido ascendente en el modelo sectorizado. ....	66
<b>Figura 34:</b> Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace ascendente en el modelo sectorizado.....	66

<b>Figura 35:</b> Representación del escenario creado para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace descendente en el modelo no sectorizado.....	67
<b>Figura 36:</b> Representación del escenario de la actuación de los interferentes para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace descendente en el modelo no sectorizado.....	69
<b>Figura 37:</b> Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido descendente en el modelo no sectorizado.....	70
<b>Figura 38:</b> Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace descendente en el modelo no sectorizado.....	71
<b>Figura 39:</b> Representación del escenario de la actuación de los interferentes para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace descendente en el modelo sectorizado.....	72
<b>Figura 40:</b> Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido descendente en el modelo sectorizado.....	73
<b>Figura 41:</b> Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace descendente en el modelo sectorizado.....	73
<b>Figura 42:</b> Áreas de mayor recepción de señal.....	76
<b>Figura 43:</b> Representación del diagrama de GANTT.....	79

## Lista de Acrónimos

- ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.
- ARQ: Automatic Repeat Request.
- BER: Bit Error Rate.
- BPSK: Binary-Phase Shift Keying.
- CAPEX: CAPital EXpenditure.
- CDMA: Code Division Multiple Access.
- d: Distancia.
- DCI: Downlink Control Information.
- DFTS-FDMA: Discrete Fourier Transform Special – FDMA.
- DL: Downlink.
- DMRS: (DeModulation Reference Signal).
- EIR: Equipment Identity Register.
- eNodeB: Evolved Node B.
- EPC: Evolved Packet Core.
- EPS: Evolved Packet System.
- E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access.
- EV-DO: EVolution Data Optimized.
- FDD: Frequency Division Duplexing.
- FEC: Forward Error Correction.
- FRF: Frequency Reuse Factor.
- G: Factor de Geometría Celular.
- GPRS: General Packet Radio Service.
- GSM: Global System Mobile.
- H-ARQ: Hybrid Automatic Repeat Request.
- HII: High Interference Indicator.
- HSPA: High Speed Packet Access.
- HSS: Home Subscriber Server.
- ICIC: InterCell Interference Coordination.
- Km: Kilometro.
- LTE: Long Term Evolution.
- m: Metro.
- MATLAB: MATrix LABoratory.
- MBSFN: Multicast-Broadcast over Single-Frequency Network.
- MHz: Megahercio.
- MIMO: Multiple Input Multiple Output.
- MME: Mobile Management Entity.
- NAS: Non Stratum Access.
- NFR: Noise Floor Raise.
- OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
- OI: Overload Indicator.
- OPEX: OPERational EXpenditure.
- PAR: Pack to Average Ratio.
- PBCH: Physical Broadcast CHannel.
- PCRF: Policy and Charging Rule Function.

- PDCCH: Physical Downlink Control CHannel.
- PDSCH: Physical Downlink Shared CHannel.
- PFR: Partial Frequency Reuse.
- PMI: Precoding Matrix Information.
- $P_N$ : Potencia de Ruido.
- P-GW: Packet Data Network Gateway.
- PRB: Physical Resource Block.
- PUSCH: Physical Uplink Shared CHannel.
- QAM: Quadrature Amplitude Modulation.
- QoS: Quality of Service.
- QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.
- RAN: Radio Access Network.
- RI: Rank Indication.
- RNC: Radio Network Controller.
- RNTP: Relative Narrowband Transmit Power.
- RRC: Radio Resource Control.
- S: Sensibilidad.
- SC-FDMA: Single Carrier-Frequency Division Multiple Access.
- SDR: Software Defined Radio.
- S-GW: Gateway Server.
- SIB: System Information Blocks
- SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio.
- SON: Selft Organization Net.
- SR: Soft Reuse.
- SRS: Sounding Reference Signals.
- TBCC: Tail Biting Convolutional Coding.
- TDD: Time Division Duplexing.
- TFG: Trabajo Fin de Grado.
- UE: User Equipment.
- UL: Uplink.
- UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.
- VoIP: Voz sobre IP.
- WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access.



## Introducción al Sistema LTE

LTE es un sistema de comunicación móvil nacido como estándar de la norma 3GPP, surge tras el sistema HSPA (High Speed Packet Access), para ello veamos cómo hemos llegado hasta él mediante la siguiente clasificación:

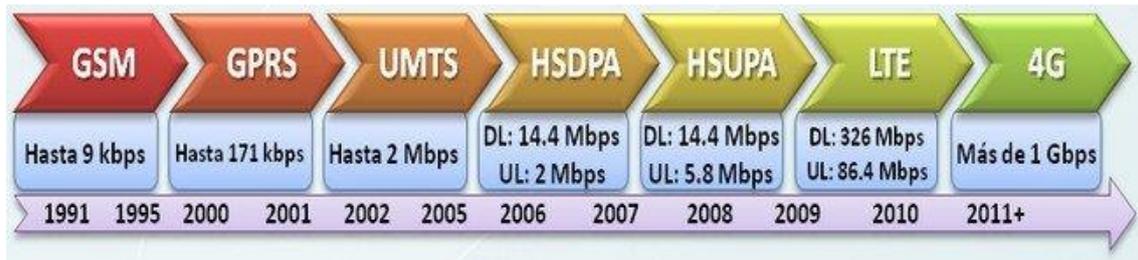


Figura 1: Evolución de los sistemas móviles.

En el mundo de las telecomunicaciones móviles se ha podido observar una gran evolución desde su gran expansión en la década de los 90. Entorno al 1990 se dio la expansión de los servicios de voz con la tecnología GSM (Global System for Mobile) [1][3][24]. A continuación, entorno al año 2000 se llevó a cabo una gran innovación en cuanto a los servicios de datos junto con la implantación del servicio radio WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) de UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Después llegó la aparición de CDMA2000 que surge del estándar 3GPP2 como podemos observar en la figura 2. LTE es la tecnología que surge tras la evolución de UMTS y que va a tener gran importancia en el desarrollo de las generaciones futuras de los sistemas móviles [2] [21].

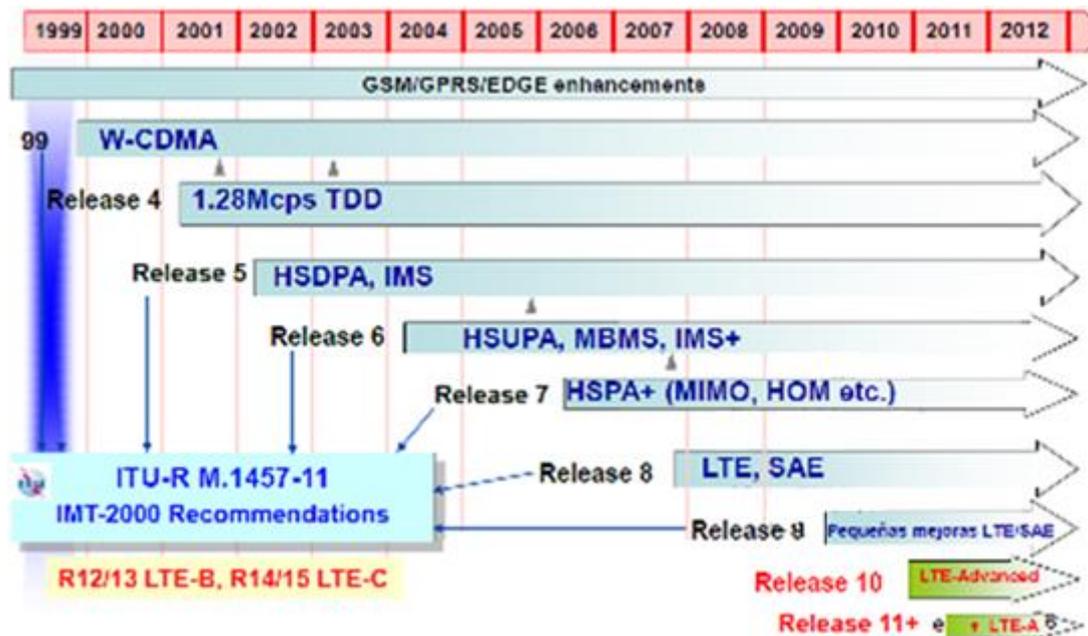


Figura 2: Estandarización.

Vista la gran influencia de los sistemas de datos entre la sociedad en los últimos años, puesto que en el año 2010 las redes UMTS consiguen que un 85% de los usuarios que utilizan los servicios móviles contraten el servicio de datos. Por ello, se genera la necesidad de investigar en sistemas que aporten mayores velocidades de transmisión y es ahí cuando llega la tecnología HSPA y en concreto la tecnología EV-DO (Evolution Data Optimized o Evolution-Data Only) que podemos observar en el modelo del 3GPP2 de la figura 3. La tecnología EV-DO es un estándar basado en las comunicaciones inalámbricas para la transmisión de datos mediante dispositivos celulares de telefonía móvil. Con el uso de esta tecnología se pretende maximizar la cantidad de información a transmitir mediante el uso de técnicas de multiplexación como CDMA (Code Division Multiple Access).

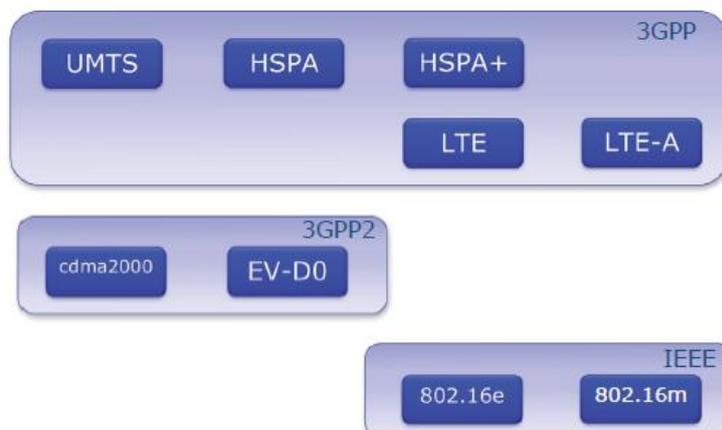


Figura 3: Sistemas móviles celulares 3G/4G.

La tecnología LTE destaca por el uso de una nueva interfaz radioeléctrica apoyada en OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) para el ascendente. Uno de los pilares en los que más hace referencia el sistema LTE es en la tecnología WiMaX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) 802.16e y 802.16m. Inicialmente WiMaX se postulaba como una tecnología 4G pero se rechazó la idea puesto que el uso de esta método trabaja orientado a redes de backhaul mientras que LTE se orienta como tecnología de la movilidad [3] [4]. También cabe destacar el uso del protocolo IP para transmitir el tráfico de datos asegurando un alto grado de QoS (calidad y servicio), también usado para la transmisión del tráfico de voz mediante el servicio de VoIP (voz sobre IP).

La evolución del sistema completo UMTS 3GPP es lo conocido como EPS (Evolved Packet System), en el que destacamos dos subniveles:

- EPC (Evolved Packet Core): arquitectura de sistemas evolucionada.
- E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access): red de acceso radio.

La motivación de Release 8 de LTE reside en asegurar la competitividad de los sistemas 3G en el futuro debido a la masiva demanda de usuarios que exigen una mayor calidad mediante la optimización de paquetes y aspectos como la seguridad, disponibilidad, velocidad y en la reducción de costes tanto de OPEX (Operational Expenditure) como de CAPEX (Capital Expenditure) [22].

La estandarización para la 4ª generación se basa en un aumento de las tasas binarias tanto en el sentido descendente como en el ascendente, consiguiendo respectivamente 100 Mbps y 50Mbps. Se caracteriza por ser 100% una red IPv6 en la que se consigue mayor cobertura y una mayor eficiencia espectral consiguiendo un mayor BW (ancho de banda) y una mejor respuesta en la transmisión para una alta movilidad permitiendo trabajar hasta con grandes velocidades y siendo el óptimo para velocidades menores. Cabe destacar la reducción de latencias y la cantidad de tiempo necesario en cambiar un dispositivo de un equipo y preparar ese equipo para producir un modelo diferente lo que permite una mayor velocidad en el procesamiento de información.

# Conceptos de Despliegue de una Red LTE y Arquitectura

Llevaremos a cabo un análisis de los mecanismos principales por los cuales se rige el sistema LTE y a continuación pasaremos a estudiar su estructura.

- Interoperabilidad entre redes: permite la compenetración con otras redes ya existentes.
- Uso de estructuras multicapa: combinación de macroceldas, microceldas, picoceldas y actualmente femtoceldas.
- Mecanismos SON (Self Organization Net): para facilitar la gestión y operación de la red de acceso radio. Con este proceso se pretende hacer las RAN (Radio Access Network) más sencillas de gestionar y de configurar mediante: auto-configuración simplificando el despliegue e instalación, auto-optimización para conseguir un proceso continuo y automático de mejora de prestaciones y auto-reparación para el tratamiento automático de situaciones de error en las redes.
- Mecanismo SDR (Software Defined Radio): dispositivo radio en el cual algunas de sus funciones de nivel físico pueden modificarse por software.
- Cabe diferenciar entre EPS y E-UTRAN [5] como podemos observar en la figura 4 :

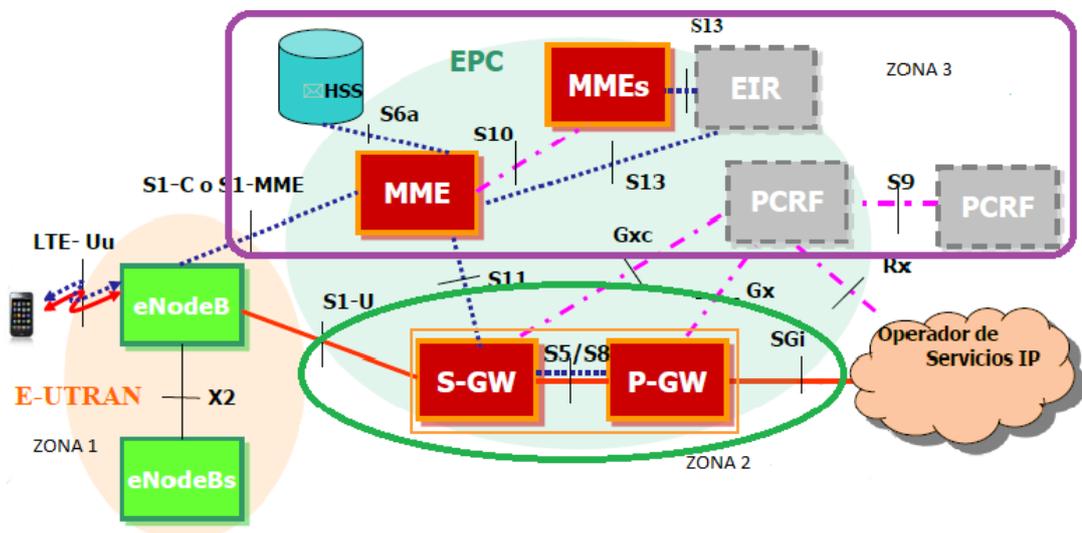


Figura 4: Arquitectura EPS.

- Implantación EPS basada en la simplificación de la arquitectura e ir añadiendo las nuevas tecnologías en cuanto a:
  - Red de acceso radio: mediante la disminución de elementos y agrupación de funciones, como ocurre con las funciones del NodoB y RNC (Radio Network Controller) en un único elemento eNodeB (evolved-NodoB) y el cambio tecnológico significativo como el acceso y la modulación.
  - Core Network: la red heredada de GSM/GPRS (General Packet Radio Service) es la conocida UMTS que se vuelve a transformar haciéndose más plana con eliminación de distintos nodos.
  
- Implantación E-UTRAN: principalmente el cambio producido es el acceso al medio utilizado respecto al del 3G, puesto que esta tecnología usará acceso múltiple. Como características podemos destacar la canalización de ancho de banda con un espaciado entre las subportadoras de 15 KHz y el uso de distintas modulaciones (QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y 64 QAM), técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output) y H-ARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) explicadas más adelante. Dentro de la arquitectura E-UTRAN vamos a diferenciar distintas áreas como podemos observar en la figura 5.

## Arquitectura e-UTRAN

En la figura 5 podemos observar con detalle cada uno de los componentes que forman este sector de la arquitectura respecto a e-UTRAN de LTE [5]:

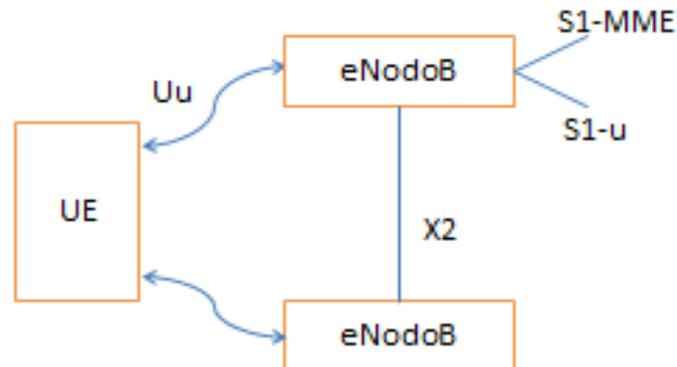


Figura 5: Arquitectura e-UTRAN.

- ❖ UE (User Equipment): equipo del que dispone el usuario para llevar a cabo la transmisión/recepción.
- ❖ eNodeB: es la estación base de LTE encargada de funciones de gestión de recursos radio, sincronización, control de interferencias, cifrado y protección de la integridad de datos.
- ❖ Interfaz X2: medio por el cual se lleva a cabo el traspaso, balance de carga y cancelación de interferencias.
- ❖ Interfaz S1-MME: encargada de la señalización del MME (Mobile Management Entity) ya que está asociada a la movilidad de los terminales.
- ❖ Interfaz S1-U: por la que se encamina todo el tráfico entre el usuario y el servidor S-GW (Gateway Server).

## Arquitectura EPC

En la figura 6 podemos observar con detalle cada uno de los componentes que forman este sector de la arquitectura de LTE [5]:

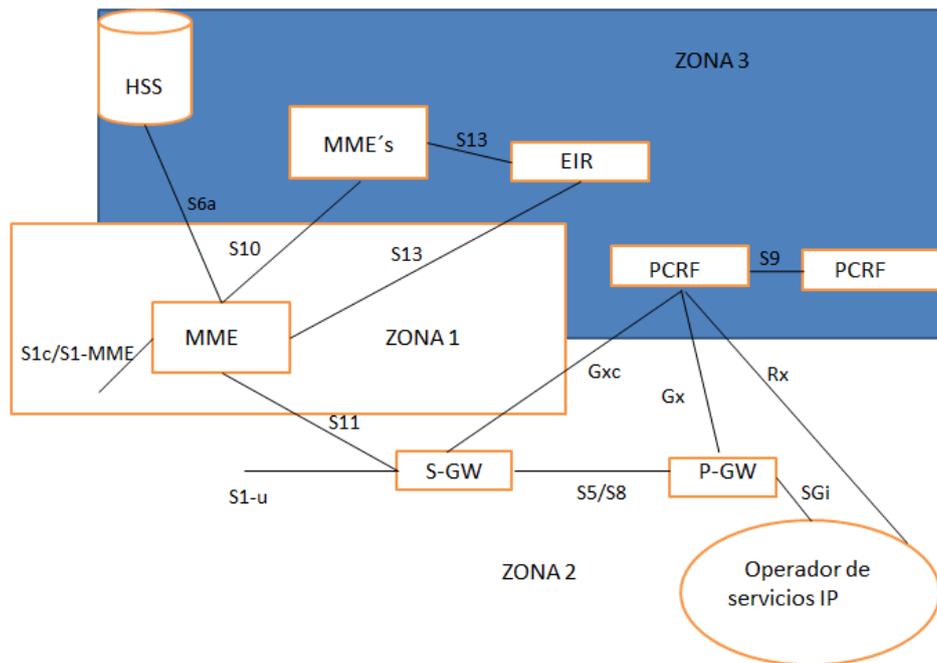


Figura 6: Arquitectura EPC.

Los elementos del EPC son:

### Zona 1

- ❖ MME: encargada de la señalización del plano de control de EPS. Realización de funciones tales como el control de la seguridad en acceso y señalización, señalización y seguridad en NAS (Non Stratum Access) entre el núcleo y el terminal, mecanismos de itinerancia y autenticación.
- ❖ Interfaz S1c: encargada de la señalización con el eNodeB.
- ❖ Interfaz S11: señalización entre los usuarios y el correspondiente S-GW (Serving Gateway) sobre IP.
- ❖ Interfaz S6a: señalización con el servidor de suscripción de abonados sobre IP.

### Zona 2

- ❖ S-GW: elemento por el cual se cursa el tráfico del usuario mediante el encaminamiento de paquetes, usándose como elemento de anclaje para la movilidad entre eNodeB's y donde se realiza el marcado para la asignación de la correspondiente QoS en el nivel de transporte para Diffserv.
- ❖ P-GW (Packet Data Network Gateway): parte de la arquitectura encargada de la conexión con redes IP's externas puesto que se encarga de recibir la dirección IP del UE y del marcado y asignación de QoS en el nivel de transporte mediante las funciones de filtrado de paquetes y facturación.
- ❖ Interfaz S1-u: sirve de conexión con el eNodeB.
- ❖ Interfaz S5 / S8: conexión de los datos entre S-GW y P-GW. S5 para la red Home y la S8 para la itinerancia.
- ❖ Interfaz S11: puente de señalización con el nodo MME.
- ❖ Interfaz SGI: para la interacción con redes externas.

### Zona 3

- ❖ EIR (Equipment Identity Register): este nodo no varía mucho del usado en la arquitectura GSM puesto que su uso es el de base de datos con información sobre dispositivos de usuario y de la identificación de aparatos que no pueden acceder a la red ya sea por motivos de robo o mal funcionamiento.
- ❖ HSS (Home Subscriber Server): es la pieza encargada de recoger los datos de los usuarios tanto de la lógica de su gestión como los de suscripción y sobretodo es donde se almacena la información para la tarea de la movilidad en LTE y entre LTE y otras redes de acceso.
- ❖ PCRF (Policy and Charging Rules Function): elemento con funciones de control de flujo en donde se toman las decisiones de políticas para el control de tráfico a través de la gestión de QoS y la autorización de servicios.
- ❖ Interfaz S9: usada para la conexión con otros bloques PCRFs.

# Características Principales del Sistema LTE

En esta área, enumeraremos algunas de las características por las que se rige el sistema LTE [6][7][8].

- Movilidad
  - Óptimo: usuarios con velocidades entre 0-15km/h.
  - Alto rendimiento: 15-120km/h.
  - Funcional: 120-350km/h.
  
- Cobertura
  - Aumenta throughput mediante la eficiencia espectral y aumentando el tamaño de las celdas, surgiendo pequeñas degradaciones en celdas de tamaño de 30 Km.
  
  - Se debe conseguir que el throughput de los usuarios situados en el borde de la celda sea el más alto posible para conseguir una calidad aceptable. El throughput de usuario en el borde de la celda se define como el punto del 5% de la función acumulativa de densidad del throughput de usuario normalizado por el ancho de banda total de la célula para permitir una velocidad de 20 Mbps para UL y 100 Mbps para DL .
  
- Capacidad de la celda: consiguiendo un volumen de hasta 200 usuarios activos en una banda de 5MHz con una flexibilidad del espectro de 1,4 a 20 MHz.
  
- Uso del ancho de banda: tanto en el enlace ascendente como en el descendente se emplea alrededor de 20 MHz en pasos de 180 KHz, es decir, 12 subportadoras en 15 KHz. También se utilizan los 7,5 KHz para el uso de multicast Broadcast Single Frequency Network principalmente como medio de acceso a los sistemas de radiodifusión de televisión.
  
- Baja latencia: característica que afecta a los tiempos de set-up y a los retardos de transmisión puesto que los confiere cortos.

- Constelaciones : debemos diferenciar distintos usos de las constelaciones dependiendo del sentido del enlace:
  - UL: QPSK, 16-QAM y 64-QAM tanto para datos como para control, no hay distinción [6].
  - DL: QPSK, 16-QAM y 64-QAM se usaran para datos mientras que para control se utilizaran BPSK (Binary-Phase Shift Keying) y QPSK [6].

Modulación	Bajada	QPSK, 16QAM, 64QAM	
	Subida	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM

Figura 7: Modelos de modulación seguidos en LTE.

- Codificación: en el plano de la codificación cabe destacar el uso de turbo códigos o TBCC (Tail Biting Convolutional Coding), se utilizan para las codificación de canal basadas en los paquetes de los canales descendentes para evitar las pérdidas por tasas de terminaciones nulas, en concreto para los canales PBCH (Physical Broadcast Channel) y PDCCH (Physical Downlink Control Channel).
  
- Modos de operación que debe soportar:
  - FDD (Frequency Division Duplexing): la duplexación por división en frecuencia tiene lugar cuando el transmisor y el receptor trabajan a distinta frecuencia portadora, la única condición que debe soportar la estación base es ser capaz de transmitir y recibir señales al mismo tiempo. Una de las ventajas del uso de FDD es que TDD (Time Division Duplexing) precisa de tiempos de guarda entre estaciones vecinas por lo que se disminuirá la calidad del espectro, o bien, se necesita sincronización entre las estaciones vecinas y para ello se debe tener en cuenta que incrementaría la complejidad ya que aumentaría el presupuesto del proyecto.

- TDD: la duplexación por división en el tiempo es la técnica para convertir un canal simplex en un canal dúplex mediante la separación de los paquetes transmitidos y recibidos en diferentes intervalos de tiempo. Usado en sistemas de radio que no precisan desplazamiento rápido. Otra ventaja es que la ruta de las ondas de los enlaces ascendentes y descendentes son muy similares. Esto significa que técnicas como la formación de rayo trabajan bien con sistemas TDD [6].

Tipo de acceso	Subida	DFTS-OFDM
	Bajada	OFDMA
Ancho de banda	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	
Mínimo TTI	1 ms	
Espacio de la subportadora	15kHz	
Prefijo de longitud cíclica	Corto	4,7µs
	Largo	16,7µs
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM	
Multiplexación espacial	Una sola capa para subida para UE Hasta 4 capas para bajada para UE MU-MIMO soportado para subida y bajada	

Figura 8: Resumen de parámetros LTE.

# Características Destacadas del Sistema LTE

En esta sección destacaremos las características más destacadas que han hecho de este sistema, LTE, una gran revolución dentro de la telefonía.

- OFDMA: es el método de acceso utilizado por el enlace descendente, puesto que en lugar de mandar un único flujo de información de gran ancho de banda, este mecanismo trata de dividir ese flujo en múltiples flujos de ancho de banda mucho menor como podemos observar en la siguiente figura [6] [7] [8].

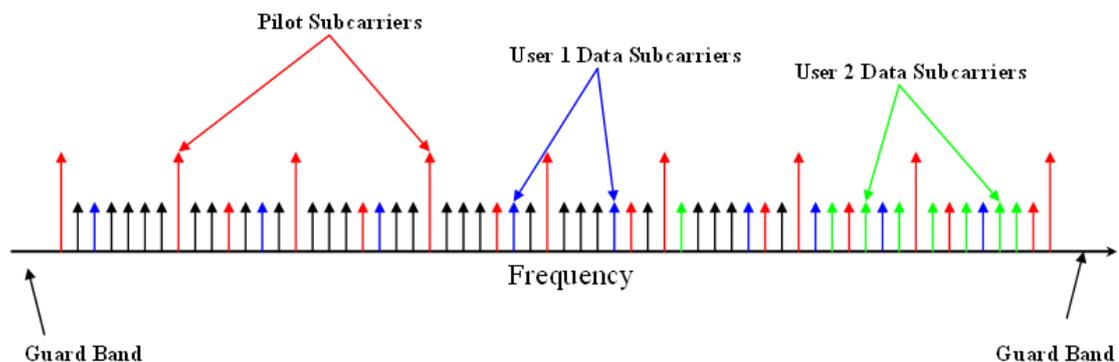


Figura 9: Representación del modo de uso del método de acceso OFDMA.

Se pueden destacar como características principales del método las siguientes:

- Transmisión de muchas subportadoras, decenas, “adecuadamente espaciadas” entre sí y con moduladores independientes. El concepto de “adecuadamente espaciadas” consiste en conseguir que la separación espectral sea el inverso de la duración del símbolo para obtener así la ortogonalidad y poder de este modo alcanzar una mayor eficiencia espectral puesto que las subportadoras podrían estar más juntas sin producir interferencias.
- La velocidad total es la suma de las tasas binarias de cada subportadora.

- Uso del prefijo cíclico: con el uso de esta método se consigue disminuir el fading por multitrayecto y conseguir funciones de guarda y piloto. Podemos distinguir dos modelos:
  - Normal: es el sistema normalmente usado para los sistemas de comunicaciones de la cuarta generación. Este prefijo será utilizado en aquellos casos en donde la separación entre portadoras sea de 15 KHz. Al utilizar una separación entre portadoras de 15 KHz permite una alta movilidad y de este modo se evita realizar ajustes de frecuencia en lazo cerrado. El primer símbolo de OFDM tendrá 5,2  $\mu$ seg de longitud mientras que el resto de símbolos tendrá una longitud de 4,7  $\mu$ seg [6] [19]. La estructura que se implementa es la reflejada en la siguiente figura:

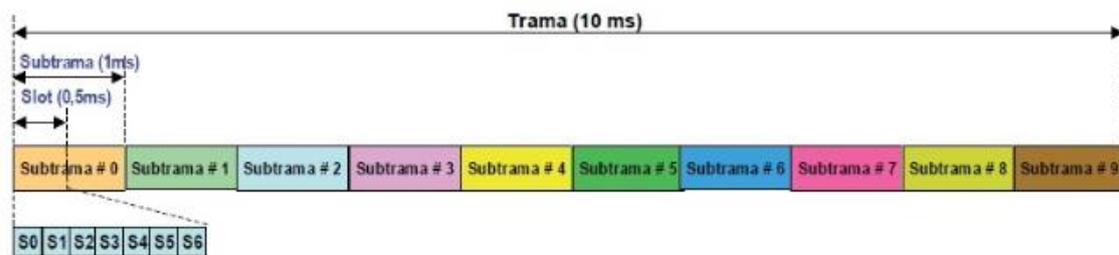


Figura 10: Estructura de trama con prefijo cíclico normal.

- Extendido: este prefijo tiene una longitud de  $16,7 \mu\text{seg}$ , esto afectará positivamente en celdas de gran tamaño y rurales puesto que la dispersión del retardo se encuentra en el propio prefijo cíclico. El uso de esta condición es principalmente para satisfacer el modo MBSFN (Red Multicast-Broadcast Sobre Frecuencia Única), modo en el cual el UE recibe y combina señales sincronizadas de múltiples celdas adyacentes [6] [19]. En la siguiente figura se puede observar la estructura de trama para este prefijo.

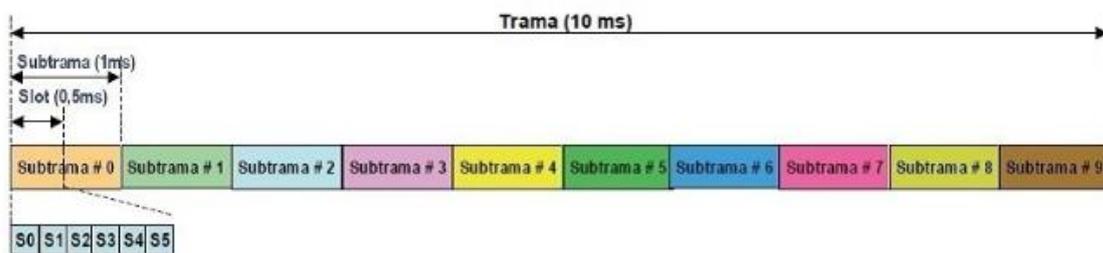


Figura 11: Estructura de trama con prefijo cíclico extendido.

- SC-FDMA: método de acceso usado por el enlace ascendente, también llamado DFTS-FDMA (Discrete Fourier Transform Special – FDMA). Es un sistema de multiplexación en frecuencia similar a OFDM que utiliza precodificación DFT o FFT en lugar de asignar símbolos a cada subportadora directamente. El objetivo es disminuir la PAR (Pack to Average Ratio) sin perder la flexibilidad de OFDMA [6] [7] [8] [9]. En la figura de a continuación podemos observar en que se basa la diferencia entre SC y OFDM.

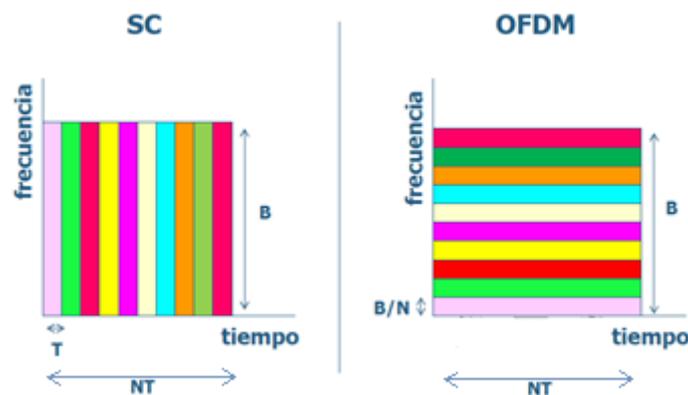


Figura 12: Conceptos SC y OFDM.

- MIMO: sistemas multi-antena creado con la intención de aumentar la capacidad del enlace como se puede observar en la figura 13. Añadiendo M antenas tanto en la transmisión como en la recepción de las señales podemos multiplicar por M la capacidad del sistema sin incrementar la potencia ni el ancho de banda [6] [7] [10]. En la Release 8 se permite hasta 4x4 en el enlace descendente y hasta 2x2 en el ascendente; mientras que en la Release 9 no hay una especificación clara con el número de antenas pero se considera un aumento de hasta 8 puertos físicos manteniendo únicamente 4 antenas físicas [11] [21] [22]. El uso de esta técnica está orientado a:
  - Aprovechamiento del canal puesto que al haber múltiples antenas (M) podemos enviar múltiples señales de información.
  - Creación de varios enlaces y luego poder elegir el que contenga mejores condiciones para la transmisión de la señal, o incluso combinarlos para poder extraer mayor información del entorno y de las condiciones.
  - Se puede conseguir una mayor cancelación de las interferencias puesto que se conoce mejor las características de la transmisión.

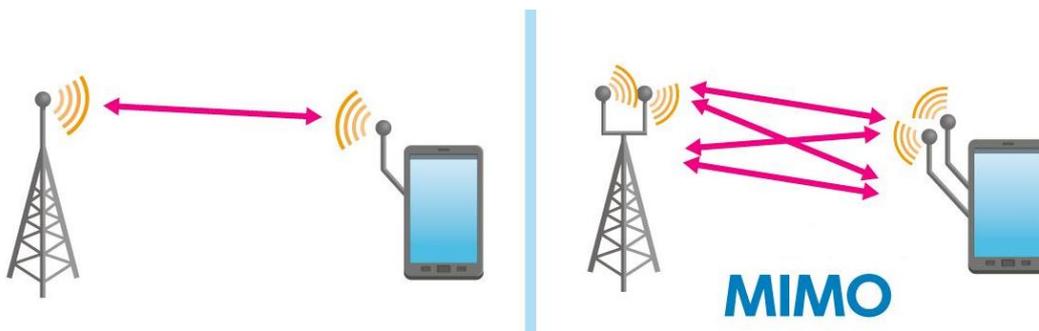


Figura 13: Concepto técnica MIMO.

- Femtoceldas: son celdas pequeñas pensadas para entornos cerrados o bien para quitar congestión a las celdas macros. Estas celdas están creadas para actuar a una baja potencia. Su modo de funcionamiento consiste en la transmisión de datos mediante el uso del protocolo IP a través del uso de la banda ancha, puesto que está conectado a conexiones residenciales de banda ancha como ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), cable o fibra óptica [13] [14] [15].

Desde el punto de vista de los operadores, a estos les beneficia en cuanto a reducir el tráfico tanto en las macroceldas y microceldas, mejorando la calidad para usuarios que operan desde áreas exteriores a edificios. Cabe mencionar desde el punto de vista del coste para los operadores, que será menor puesto que se precisa de menores escenarios basados en macroceldas y por lo tanto la no necesidad de hacerse con el espacio de radiofrecuencia de la zona.

El origen de la femtocelda se crea como una herramienta básica para el salto hacia la cuarta generación, se usan para extender el alcance de las redes celulares en el interior de los edificios como se ilustra en la siguiente figura:

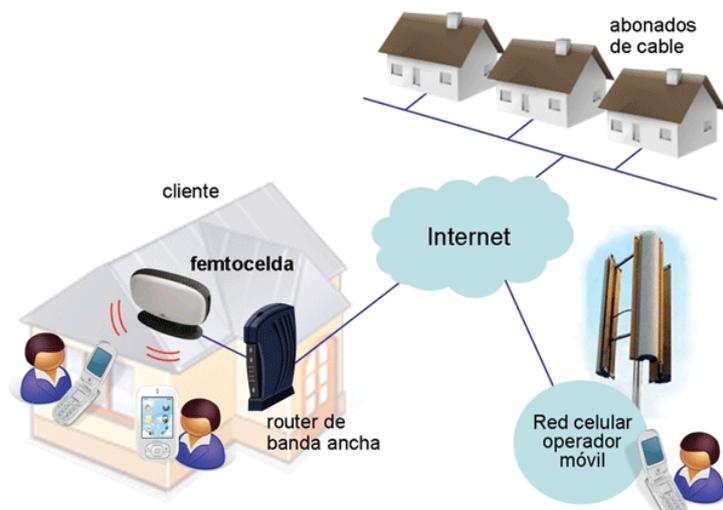


Figura 14: Modo de empleo de las femtoceldas.

Para el uso del sistema basado en las femtoceldas es necesario disponer de una conexión a través de un modem ADSL para que pueda operar junto con la red del operador mediante la conexión a internet del usuario. Podemos sacar como conclusión que se ha alcanzado unificar las redes fijas-móviles sin la necesidad de ningún otro dispositivo, sino que simplemente se realiza mediante la tecnología 3G de los dispositivos que existen en el mercado. Para poderse llevar a cabo esta técnica debe tenerse en cuenta aspectos tales como:

- Localización geográfica del equipo: por motivos de planificación de potencia y de los canales de radiofrecuencia, y con el propósito de evitar el mayor número de interferencias posibles, es necesario conocer la posición del móvil, puesto que es fundamental para evitar las interferencias con la macrocelda del mismo operador u otros.
- QoS: asegurar un mínimo de calidad y servicio, transmitiendo con la menor potencia posible, para así producir la menor interferencia a otros enlaces. Hace que los valores de calidad estén al límite de su cobertura y esto provoca que la probabilidad de fallo en la comunicación se incremente.
- Compartición del uso de ancho de banda con las llamadas de voz: puesto que permite alcanzar velocidades de descarga de hasta 150 Mb, se reafirma el hecho de que sólo aquellos operadores que proporcionan los servicios combinados de fijo-móvil pueden arbitrar mecanismos para coordinar el uso de internet a través de las femtoceldas como podemos observar en la figura 15, y de este modo asegurar un mínimo de calidad.
- Aunque la potencia utilizada para la transmisión sea mínima, la relación señal a ruido más interferencia obtenida será algo elevada a causa de las distancias entre el transmisor y el receptor puesto que serán escasas.
- Tecnología futura: en la actualidad se intenta realizar cambios para controlar lo máximo posible los niveles de contaminación electromagnética, a través del uso de femtoceldas se consigue disminuir estos valores puesto que para un país como España se necesitarían miles de estaciones base para ofrecer cobertura en todos los puntos geográficos, y además, se calcula que cada una de estas antenas consumiría unos valores eléctricos cercanos a 2.6 KW, y de este modo se podría disminuir el número de las estaciones puesto que gran parte del tráfico que se cursa en la actualidad tiene origen dentro de entornos cerrados.
- La BER (Bit Error Rate) de un sistema puede ser utilizada para la planificación de un enlace a través de la relación obtenida mediante la fórmula de Shannon que relaciona la capacidad del enlace y la relación SINR para ese valor de BER prefijado.
  - Capacidad del enlace inalámbrico: dependiente de la cantidad del espectro radioeléctrico que se le haya asignado a dicho canal.
  - SINR: parámetro dependiente de valores como la potencia emitida por el transmisor, cantidad de potencia interferente, nivel de ruido, pérdidas de propagación o la existencia de desvanecimiento de la señal.

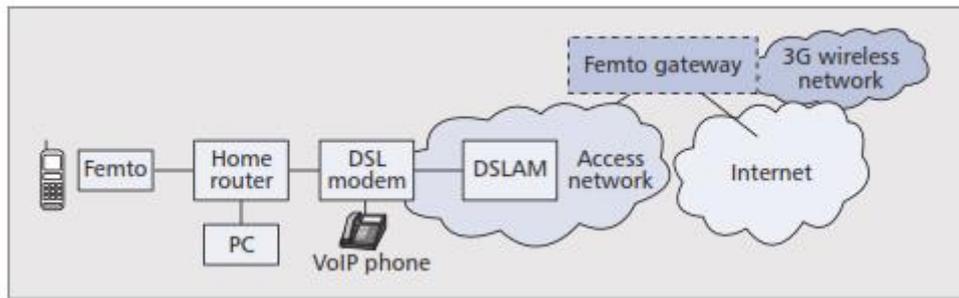


Figura 15: Despliegue de las femtoceldas.

- Protocolo IP: protocolo basado en la comunicación de datos digitales de la capa de red siendo la base fundamental del funcionamiento de internet, permitiendo la transmisión de datos entre redes de computadoras [16]. Sus principales características son:
  - Es un protocolo no orientado a conexión.
  - Puede realizar la fragmentación de paquetes en el origen si fuera necesario y en el destino reconstruir el mensaje original.
  - Tamaño máximo de los paquetes de 65635 bytes.
  - Usa direccionamiento mediante direcciones lógicas IP de 32 bits.

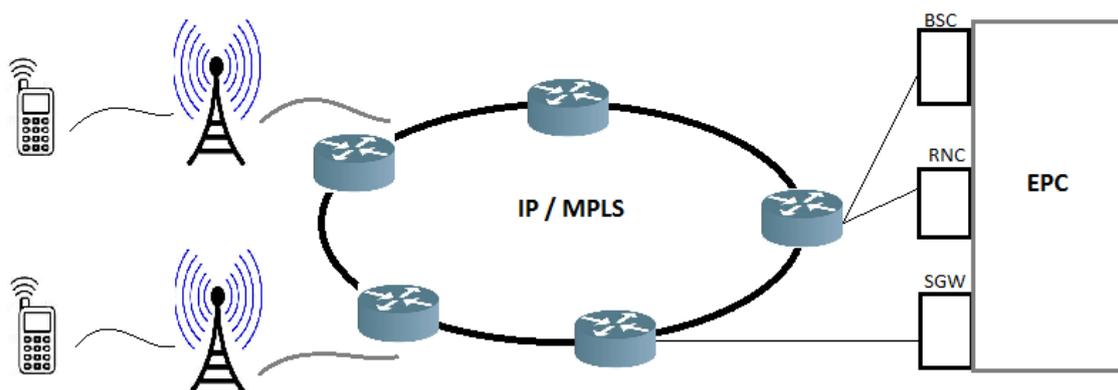


Figura 16: Conexión entre protocolo IP y el sistema LTE.

# Control de Interferencia y de Potencia

En esta sección vamos a analizar el comportamiento del sistema en cuanto al control de potencia y de interferencia, y todos los factores en los que influye. Además, nos ocuparemos también de definir algunas estrategias creadas para el control de la interferencia y diferenciar los distintos tipos de la misma.

## Control de potencia

El control del uso de la potencia se realiza mediante la diferencia entre la potencia máxima del transmisor y la potencia nominal de transmisión necesaria para conseguir un formato de codificación y modulación adecuado. Debemos hacer una diferencia entre el sentido ascendente y el descendente [7] [17].

- Enlace descendente: la potencia es conocida ya por el planificador del enlace de bajada del propio nodo eNB donde la potencia es típicamente constante.
- Enlace ascendente: la potencia es fijada puesto que es necesaria la comunicación entre el terminal y el eNB (el planificador del enlace de subida) mediante un mensaje conocido como power headroom. Para este cálculo, es más complejo que para el sentido descendente, puesto que en el ascendente se hace un control de potencia que dependerá de la distancia y de la interferencia.

Algunas estrategias en cuanto a la decisión de elección respecto a que PRB (Physical Resource Block) y en que subtrama debe transmitir la información cada usuario son:

- 1) **MR (Maximum Rate)**: este método elige al usuario con el mejor canal radio en un PRB dado; esta elección depende de los procesos de adaptación del enlace que comprueban la calidad del canal para así asignar una codificación y modulación acorde con las características de la transmisión, y de ese modo obtener un buen uso del espectro de frecuencias. Del ancho de banda del PRB se extrae la tasa binaria de datos. Esta estrategia permite obtener una máxima capacidad del canal puesto que gracias a que cuenta con un elevado número de usuarios y por lo tanto siempre o casi siempre habrá alguno que se aproxime a la capacidad máxima de transmisión. Por ello, podemos decir que este proceso de decisión no es justo, puesto que si un usuario cuenta con una localización siempre cercana a la estación base, siempre obtendrá las condiciones más favorables y privará al resto de

obtener una capacidad superior; por lo cual, este método es inadecuado respecto a calidad y servicio.

- 2) **RR** (Round Robin): esta estrategia asigna el canal cíclicamente sin depender de las condiciones del canal ni del usuario, es considerada un reparto justo, pero tampoco es ideal puesto que asigna el mismo tiempo de acción a todos los usuarios y por ello los usuarios con peores condiciones necesitarán más tiempo de acción para igualar las condiciones de calidad de transmisión del resto.
- 3) **PF** (Proportional Fair): trata de asignar el reparto de recursos más justo, mediante la siguiente fórmula podemos comprobar su modo de operación el cálculo de la tasa empleada:

$$M_n(t) = \underset{\{m\}}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{R_{m,n}(t)}{W_{m,n}(t)} \right\} \quad (1)$$

Donde:

$R_{m,n}(t)$ : tasa binaria que tendrá un usuario en caso de obtener el canal.

$W_{m,n}(t)$ : tasa binaria media.

## Planificador semi-persistente

Es el uso del planificador para servicios con pequeños volúmenes de tráfico que llegan de forma regular, por ello, el planificador dinámico puede ser ineficiente desde el punto de vista de la sobrecarga de señalización. El planificador semi-persistente permite indicar a un terminal que una asignación del planificador es válida en los sucesivos periodos de T subtramas, no siendo necesario enviar señalizaciones PDCCH en ese momento. Las decisiones respecto al número de tramas que se van a reservar y la activación/desactivación del planificador semi-persistente reside en las capas RRC (Radio Resource Control).

El protocolo RRC va ser utilizado para realizar funciones del plano de control tales como la gestión de la conexión a nivel radio entre móvil y eNB, funciones de control de movilidad y para el uso de servicios portadores, podemos observar su posición en la figura 17. De este modo, se debe hacer referencia a los distintos canales en donde se lleva a cabo el proceso: canales lógicos, canales de transporte y de canales físicos [6] [12].

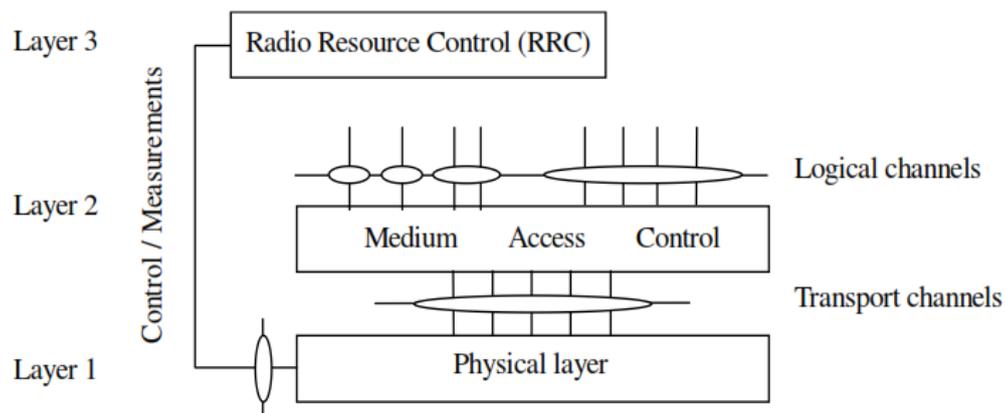


Figura 17: Estructura de la interfaz radio.

- Canales lógicos: encargados de la identificación de la información que se va a transmitir tanto de control como usuario, entre las capas RLC y MAC.
- Canales de transporte: localizados entre las capas MAC y la física van a identificar y definir con qué características se va a transmitir la información.
- Canales físicos: encontrados en la propia capa física y encargados de la transmisión y recepción de la información en la interfaz radio.

Además, destacar que el terminal puede seguir recibiendo asignaciones del planificador dinámico a la vez que también recibe las tramas persistentes; en caso de conflicto, prevalecen las tramas dinámicas.

## Adaptación dinámica del enlace

Es la selección de formato de codificación y de modulación que asigna el planificador usado por LTE para cada usuario [18]. Para ello, se va variando la tasa binaria en función de la calidad del canal de tal modo que quedaría resumida de la siguiente manera:

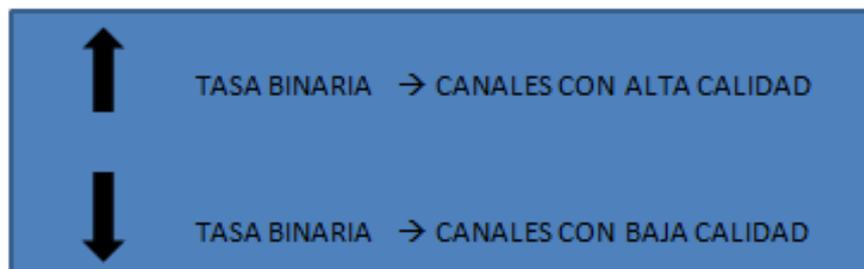


Figura 18: Concepto de variaciones de tasas.

En este aspecto, también se debe apreciar una distinción dependiendo el sentido de la comunicación:

- **Enlace ascendente:** el control se lleva a cabo mediante SRS (Sounding Reference Signals). El mecanismo SRS se centra básicamente en transmitir una señal por el UE definida con una secuencia ya conocida, muy parecida a la señal de referencia de la demodulación en este sentido, y de este modo, el eNB puede usarla para estimar la calidad.

Además, en el sentido ascendente hay que mencionar la señal DMRS (DeModulation Reference Signal) ya que es la señal utilizada para la sincronización y estimación del canal. Se diferencian dos modelos:

- DMRS para PUSCH (Physical Uplink Shared CHannel): señal transmitida en el cuarto símbolo de cada PRB para cuando se está usando un prefijo cíclico normal o en el tercer símbolo en caso de que se utilice prefijo cíclico extendido. El canal PUSCH es compartido por todos los UE y se encarga del transporte de los datos de usuario e información de control del propio UE y la DMRS.

- DMRS para PUCCH: señal que ocupa 2 PRBs en cada subtrama cuando se transmite. Se utilizará el canal PUCCH para el transporte de información de control del UE con el uso de parámetros como mensajes ACK/NACK e PMI (Precoding Matrix Information) y/o RI (Rank Indication) para las técnicas MIMO. El UE únicamente utilizará el canal PUCCH si no tiene datos de usuario para transmitir, en caso contrario, multiplexa en el PUSCH la información de control y de usuario.
- **Enlace descendente:** la información necesaria viene recogida en el canal Status Reports (SR), en el que se almacena una selección de los enlaces descendentes posibles para llevar a cabo la transmisión dependiendo de las condiciones de los distintos enlaces. Además en el enlace descendente influyen la información recogida a través de los canales:
  - PBCH: canal que recoge información básica del sistema tal como identificación de redes, configuración técnica MIMO, longitud del prefijo cíclico...
  - PDSCH (Physical Downlink Shared Channel): canal encargado de transportar los datos de usuario y de transportar los SIB (System Information Blocks).
  - PDCCH (Physical Downlink Control Channel): encargado de transportar la DCI (Downlink Control Information) y el H-ARQ.

Una vez recogidos los datos, se determina una codificación y una modulación para de este modo garantizar una tasa de error adecuada.

## Interferencia dentro de los equipos móviles

La interferencia de dentro de los celulares se puede clasificar en intercelular e intracelular.

- Intercelular: cuando la interferencia afecta a transmisiones de/para usuarios servidos por distintas celdas.
- Intracelular: cuando la interferencia se produce de/para usuarios de una misma celda.

En primer lugar debemos destacar que el sistema móvil que estamos analizando, LTE, está exento de interferencia intracelular, ya que la función del planificador, el cual ha sido analizado anteriormente, consiste en asegurar que un PRB sólo pueda ser asignado a las transmisiones de un único usuario en cada subtrama. Evitando de este modo las colisiones entre las transmisiones de múltiples usuarios al acceder al canal compartido mediante los canales PDSCH (Physical Downlink Synchronization Channel) o PUSCH (Physical Uplink Synchronization Channel).

En cambio, si existe interferencia intercelular entre equipos transmisores de/para usuarios con el mismo PRB, asignado en la misma subtrama en distintas celdas, más aún si se trata de celdas adyacentes. Este problema puede afectar a funciones tales como:

- Disminuye la SINR por PRB, con lo que se debe seleccionar esquemas de modulación y codificación de mayor protección, y de baja eficiencia espectral para poder conseguir reducir la cantidad de bits que se pueden enviar por PRB.
- Aumentar la potencia de transmisión en el enlace ascendente para asegurar una recepción del mensaje adecuado, con lo que ampliará el consumo de potencia en el terminal y de baterías.
- Se necesitarán por lo general más retransmisiones híbridas para la entrega favorable de paquetes, y por consiguiente se verá aumentada la carga de señalización. Las retransmisiones híbridas consisten en estrategias para la corrección de errores combinando las técnicas FEC (Forward Error Correction) y ARQ (Automatic Repeat Request) explicadas a continuación con mayor detalle. Para el canal descendente se usa la señalización del canal HS-SCCH que transporta información relativa al H-ARQ y el algoritmo FEC; mientras que para el ascendente se usará el canal de señalización HS-DPCCH llevando información de señalización de H-ARQ e información de UE (estimación del canal radio).

- FEC: función de corrección adelantada de errores. Permite corregir los errores directamente en el receptor sin la necesidad de efectuar una retransmisión de la señal original. Esta técnica es utilizada en sistemas en los cuales se transmite en tiempo real o en aquellos que no introducen retorno.
- ARQ: mecanismo de detección de errores y petición de retransmisión del mensaje del error. Se detecta el error y se es consciente de que hay un error, pero exactamente no se identifica en que trama; a continuación introduce redundancia para localizarlo y poder decidir si usar más o menos ancho de banda. Por último, sigue analizando por si hubiera más errores, y en caso de encontrar más errores ya pide al destino una retransmisión.

En sistemas anteriores como GSM, la interferencia intercelular se mitigaba principalmente en la fase de despliegue y planificación de frecuencias, mediante técnicas de planificación de agrupación de celdas y reuso de frecuencias. Por ello, con LTE se busca conseguir una eficiencia espectral mayor mediante un reuso de frecuencias universal, donde todos los PRBs estén disponibles en todos los nodos eNB maximizando la capacidad potencial por celda, aunque de este modo, la interferencia intercelular podría llegar a ser muy elevada sobre todo entre celdas adyacentes y para usuarios alejados del eNB. Para eso, LTE define una gestión de recursos denominada **InterCell Interference Coordination (ICIC)** que se encarga de gestionar de forma dinámica la interferencia intercelular [17].

En la siguiente figura podemos observar el esquema del sistema ICIC seguido en LTE:

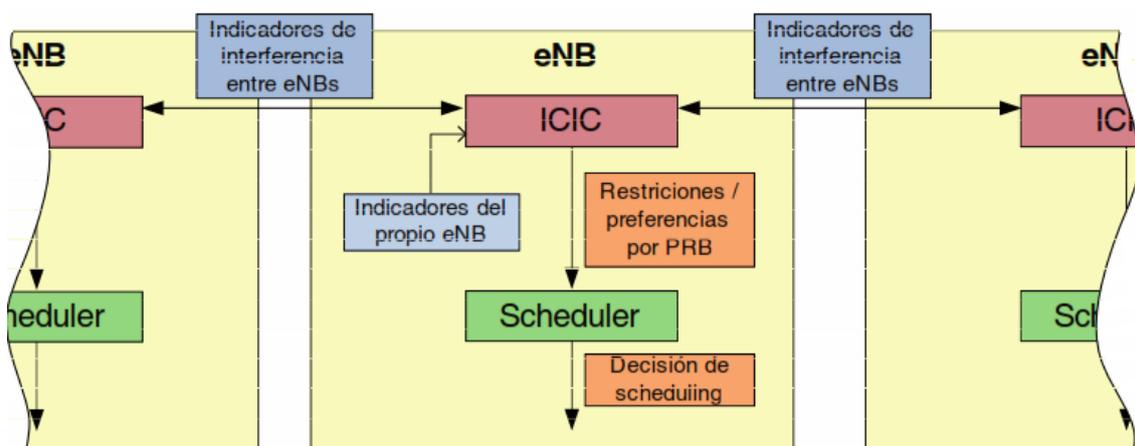


Figura 19: Esquema de las funcionalidades del sistema ICIC.

La función del ICIC reside en cada eNB, pero a su vez para su correcto funcionamiento requiere la interacción de varios eNBs, tratándose así de una funcionalidad de gestión de recursos de radio multicelda. El objetivo del sistema ICIC es decidir un conjunto de restricciones y preferencias sobre el uso y la potencia de transmisión por PRB de un determinado eNB para mitigar lo máximo posible la interferencia intercelular; dependiendo de estas decisiones tomadas, el planificador de paquetes escogerá las transmisiones necesarias de los usuarios en cada eNB.

El sistema ICIC funciona a través de unos indicadores de interferencia, son el medio por el cual se recibe la información acerca de la situación en la que se encuentran los usuarios, estos intercambian información entre los eNBs así como información procedente del propio eNB.

Debemos señalar que la función del ICIC de LTE se realiza en el dominio de la frecuencia y no en el dominio temporal, puesto que afectaría en los procesos de codificación híbrida, especialmente en el sentido ascendente con el uso del HARQ síncrono puesto que los procesos de retransmisión se efectúan en instantes de tiempo predefinidos con respecto a la transmisión inicial.

En LTE los indicadores de interferencia se clasifican en dos grupos:

- **Reactivos:** son agentes que recopilan información basados en medidas del pasado, de manera que si un eNB detecta una interferencia intercelular muy elevada se lo notifica a las celdas colindantes para que estas reduzcan la interferencia.
- **Proactivos:** son agentes que se adelantan a los hechos mediante la notificación de un eNB con antelación a los eNBs vecinos sobre el uso que va hacer de los PRBs en frecuencia: con qué frecuencia va a transmitir, con qué potencia en cada PRB y dónde pretende planificar las transmisiones de los usuarios si en el centro o en el borde de la celda donde se genera mayor interferencia. De este modo, las celdas vecinas pueden predecir la interferencia intercelular que el eNB va a generar.

A continuación, se expone un ejemplo mediante la siguiente figura para lograr una mayor comprensión del funcionamiento de dichos agentes [7] [18].

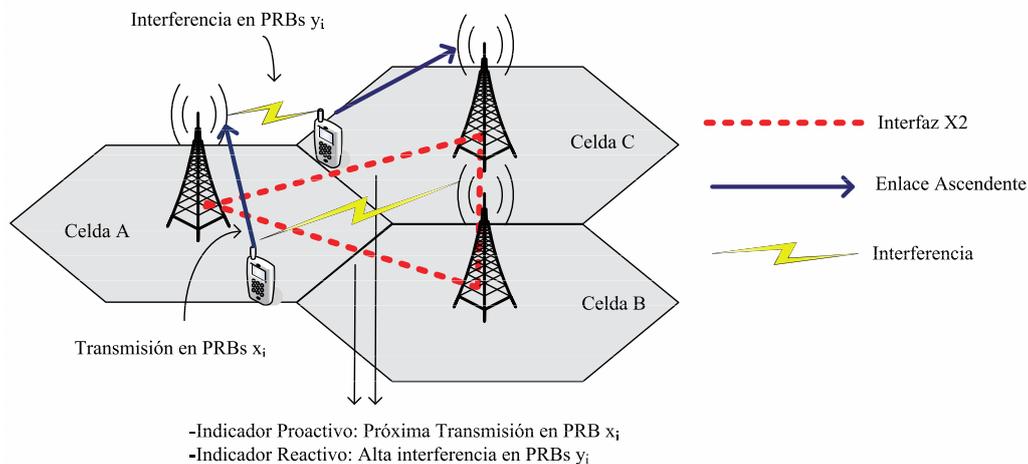


Figura 20: Funcionamiento de los agentes de interferencia.

El usuario de la celda C desea transmitir con un bloque de PRBs denominados " $y_i$ " y al encontrarse en el borde de la celda junto a la celda A, este usuario produce interferencia en la celda A, exactamente afectará al receptor eNB en el conjunto de los PRBs " $y_i$ ".

A la vez que el usuario de la celda A desea transmitir con el conjunto de los PRBs " $x_i$ ", puesto que está planificado por el planificador que actúa en el enlace ascendente, y además debe hacerlo con alta potencia debido a la lejanía del centro de la base de la celda A. Por ello, generará fuerte interferencia intercelular a la celda B, la cual se encuentra cercana a dicho móvil.

Los mecanismos del sistema ICIC se pueden dividir en dos:

- 1) El indicador reactivo hace que la celda A informe a las vecinas, B y C, que percibe una fuerte interferencia en los PRBs " $y_i$ " a fin de que estas intenten reducir esa interferencia.
- 2) El indicador proactivo hace que la celda A avise a las celdas vecinas que transmite con alto nivel de potencia en los PRBs " $x_i$ ", para que estas celdas no usen ese bloque de PRBs.

## Indicadores de interferencia y estrategias ICIC en downlink

El indicador de interferencia en el enlace descendente se denomina RNTP (Relative Narrowband Transmit Power). Se trata de un único indicador proactivo que nos muestra la máxima potencia de transmisión en el DL por PRB. El funcionamiento que sigue este indicador es a través de un vector con tantos bits como PRBs disponibles hay en el sistema, cada eNB lo envía a sus vecinas a través de la interfaz X2. Es decir, si un bit está marcado a 0, las celdas vecinas saben con certeza que el eNB no va a transmitir en ese PRB o lo hará con un nivel de potencia por debajo de un determinado umbral denominado RNTPthreshold; esto hará posible las estrategias de transmisión del sistema ICIC para otorgar cierta preferencia a la planificación de transmisión en los PRBs, que en principio experimentarían baja interferencia. Por el contrario, si el bit está a 1, los eNBs vecinos no tienen garantía de que la interferencia en esos PRBs sea baja, ya que el eNB de interés podría superar el RNTPthreshold. Por ejemplo, el eNB podría estar a 1 si planease hacer planificación de usuarios situados en el borde de la celda en el PRB correspondiente y a 0 si los usuarios estuviesen próximos.

Con el RNTP y el RNTPthreshold es posible establecer una estrategia de ICIC que fuera seleccionando de forma dinámica distintos factores FRF (Frequency Reuse Factor), según las condiciones de interferencia intercelular detectados en el sistema. Es importante destacar que no se trata de un reuso estático como se usaba en el sistema GSM, si no que cada eNB tiene potencialmente todo el espectro disponible en caso de necesitarlo y que este reuso se obtiene con el establecimiento on-line de una serie de restricciones sobre el uso de PRBs; al igual que hay que destacar que estas estrategias también son válidas para el enlace ascendente.

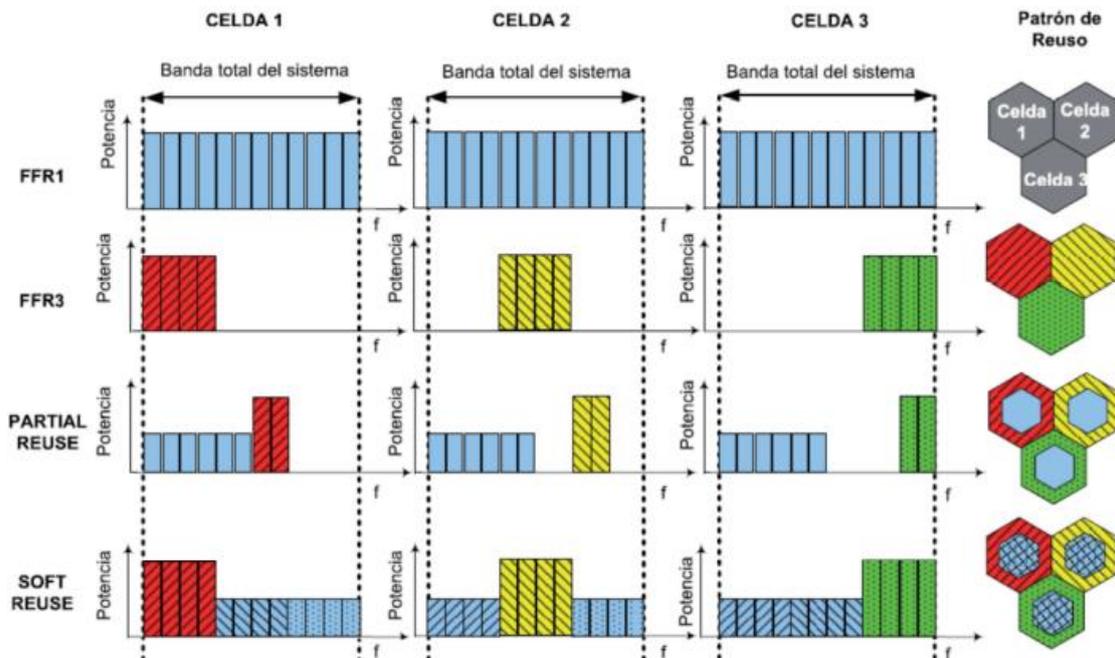


Figura 21: Posibles esquemas de reuso de frecuencias a través de ICIC.

### 1. *Frequency Factor Reuse 1*

Este esquema hace referencia a un escenario donde todos los PRBs están disponibles en todas las celdas. No se impone ninguna restricción ni a la frecuencia de uso ni a la potencia asignada. Tiene como características principales:

- Alta velocidad en la transmisión de los datos.
- Peor escenario posible para la interferencia entre celdas, en concreto, en los bordes de estas.

En este esquema se realiza una asignación de frecuencia equitativa en cada uno de los sectores cómo podemos observar claramente en la figura 22.

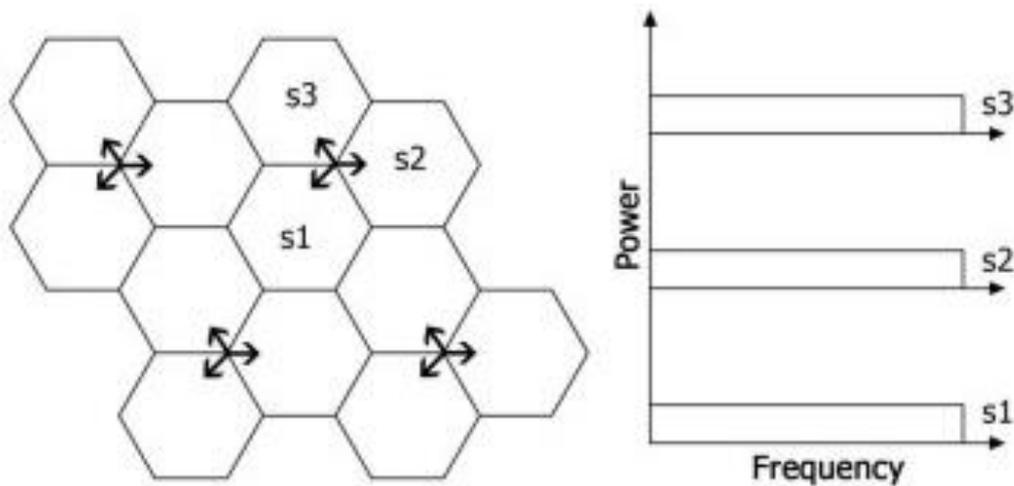


Figura 22: Modelo FRF 1 de estrategias de reuso de frecuencias.

### 2. *Frequency Factor Reuse 3*

Modelo para el cual los PRBs se dividen en tres grupos donde se asigna a tres celdas. Este método es bastante útil a la hora de reducir la interferencia intercelular, aunque se reduce considerablemente la capacidad potencial por celda y no se llegan a lograr altos valores de pico. Como características principales destacamos:

- Se consigue una interferencia entre celdas moderada.
- Baja capacidad debido a que únicamente se utiliza 1/3 de la total disponible y de este modo no solapan al resto de celdas.

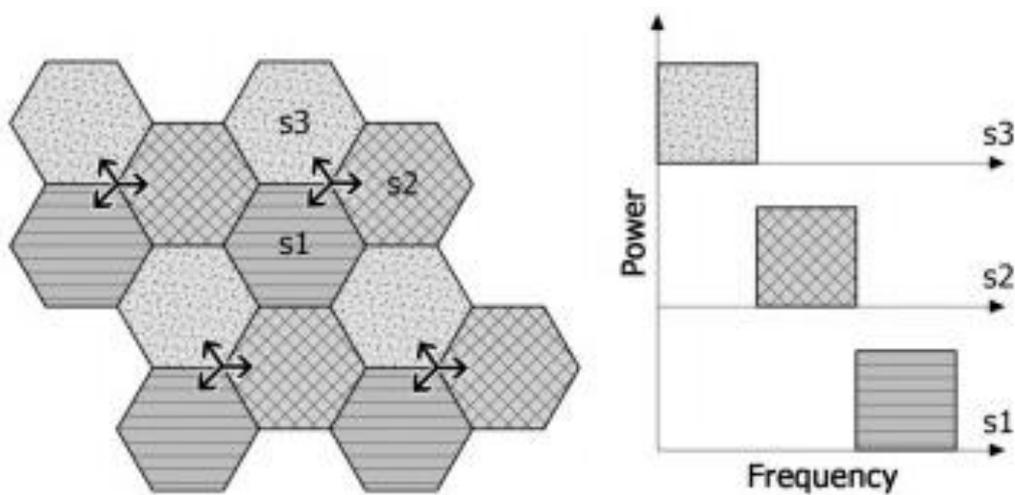


Figura 23: Modelo FRF 3 de reuso de frecuencias.

### 3. *Partial Frequency Reuse*

La idea fundamental de este modelo es dividir todos los recursos disponibles en dos subconjuntos o grupos, el principal y el grupo de menores. El grupo principal es usado a fin de servir a los usuarios del borde de la celda, mientras que el de menores está orientado para cubrir a los usuarios del centro de la celda.

Se usa para restringir parte de los recursos, de modo que algunas frecuencias no se usan en algunos sectores en absoluto. El factor de reutilización de este sistema depende de la fracción de frecuencia no utilizada. El PFR también es conocido como: “FFR en total aislamiento”, ya que los usuarios del borde están totalmente protegidos de las celdas adyacentes.

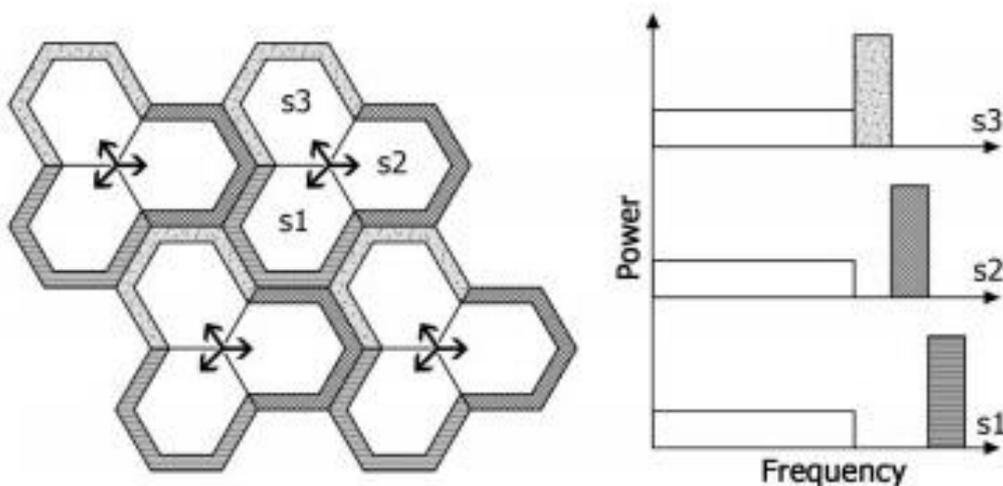


Figura 24: Modelo PRF de reuso de frecuencias.

4. *Soft Reuse*

En este último esquema de reutilización de frecuencias, lo que se pretende es conseguir que cada sector trate de transmitir en la banda de frecuencia completa. Por el contrario, el sector usa toda la potencia en algunas sub-bandas de frecuencia, mientras que la potencia requerida se usa en el resto de la banda de frecuencia. Podemos ver en la siguiente figura la clara intención con la que se hace el reparto, para que de este modo se evite la mayor interferencia posible.

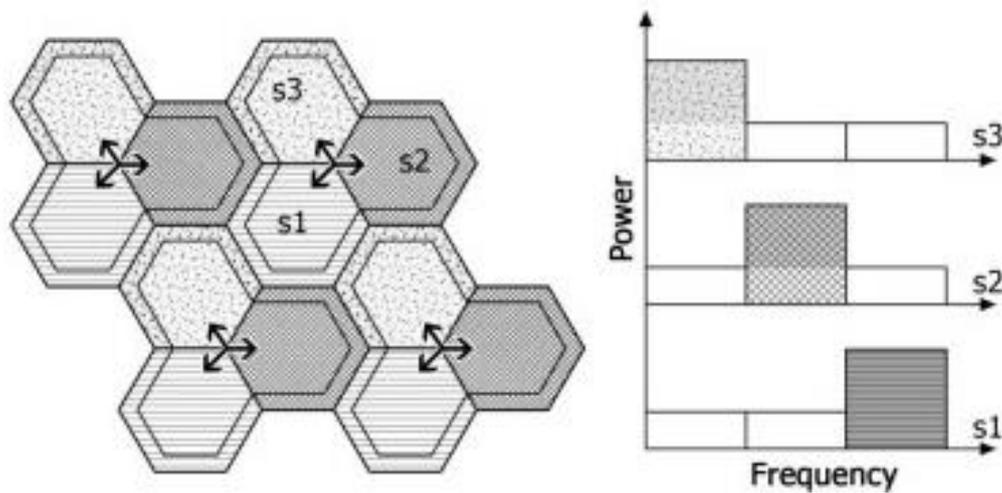


Figura 25: Modelo SR de reuso de frecuencias.

## Indicadores de interferencia y estrategias ICIC en uplink

En el caso del enlace ascendente se ha estandarizado un indicador reactivo y otro proactivo.

El indicador proactivo denominado HII (High Interference Indicator) consiste en la creación de un mensaje con un bit por cada PRB que la celda servidora envía a los eNBs vecinos, anunciándoles (puesta en marcha, bit a 1) la intención de utilizar esos PRBs para planificar las transmisiones de los usuarios en el borde de la celda, es decir, de aquellos que generan mayor nivel de interferencia.

Por otro lado, el indicador reactivo se denomina OI (Overload Indicator), este indicador consiste en un mensaje que muestra para cada PRB si la interferencia más el ruido medidos es baja, media o alta.

Las estrategias ICIC utilizan estos indicadores como medida de prevención de los PRBs para intentar evitar los PRBs con alta interferencia reportados por HII, y conseguir que se reduzca la interferencia causada a la celda que inicialmente envió el mensaje del indicador OI.

El funcionamiento entre el indicador reactivo y proactivo dependerá del fabricante, como ejemplo podemos destacar aquellos en donde el planificador se encarga de organizar a los usuarios de las zonas del espectro, complementarios a aquellos donde el indicador HII ha considerado y detectado que hay alta interferencia, y poder así ajustar el control de potencia mediante el indicador OI.

## Otras técnicas de mitigación de interferencia intercelular

Junto con las estrategias recogidas anteriormente, existen otras que pueden lograr disminuir la interferencia intercelular en este sistema móvil, LTE. Las técnicas más destacadas son: partial pathloss compensation y acceso por división espacial.

### **Partial pathloss compensation**

Esta técnica está centrada en conseguir reducir la interferencia a través del control de potencia, en donde se realiza un control de la potencia transmitida en el enlace ascendente para compensar sólo una fracción de las pérdidas de propagación del enlace radio.

Las técnicas partial pathloss compensation cuentan con dos parámetros, tarjeta receptora de potencia ( $p_0$ ) y factor de compensación ( $\alpha$ ). Mediante el parámetro de compensación se pueden generar dos configuraciones de compensación:

1.  $\alpha = 1$  → Modo de compensación total definida por un valor asignado de potencia que asegura una determinada SINR para un determinado formato de modulación y de codificación.
2.  $\alpha < 1$  → Modo de compensación parcial en donde un incremento de pathloss no tiene un incremento en la misma proporción de la potencia transmitida. Esto es útil para reducir la potencia transmitida de aquellos usuarios situados en el borde de la celda, a la vez que se consigue reducir la tasa binaria y por lo tanto disminuye la interferencia que pueden introducir e introducen estos terminales.

### **Acceso por división espacial**

Otros métodos propuestos centran su interés en técnicas de acceso por división espacial y beamforming, donde se crean haces directivos en los diagramas de radiación de la antena para de este modo localizar la máxima radiación y así reducir la interferencia intercelular. Este sistema centra su técnica en la aplicación de técnicas MIMO a través de la separación espacial de las antenas. Se consigue mediante la combinación de elementos en una matriz escalonada de tal forma que las señales en ángulos particulares experimentan una interferencia constructiva [2] [8].

Para cambiar los valores de estos ángulos definidos por la matriz escalonada durante la transmisión, se utiliza un conformador de haz, que se encarga de controlar la fase y la amplitud relativa de la señal en cada transmisión, de este modo poder variar la dirección de esos ángulos; y poder conseguir crear un patrón de interferencia constructiva. Podemos diferenciar dos modelos:

1. Conformadores convencionales: aquellos que utilizan un conformador de haz fijo o conmutado. Utilizan un conjunto fijo de coeficientes y se aprovechan de los retrasos en el tiempo de las señales para combinar las señales en la matriz, sobre todo utilizando la información acerca de la ubicación de los sensores en el espacio y las direcciones de ondas de interés.
2. Conformadores de adaptación o matriz escalonada: combinan la información recibida de las señales con las propiedades realmente aceptadas por la matriz, por lo general, se usan para mejorar el rechazo de las señales no deseadas y descartar aquellas señales no compatibles. Podemos diferenciar dos modelos:
  - a. Modelo de maximización de la señal deseada.
  - b. Modelo de minimización de la interferencia de señales o el modo de cancelación.

Asimismo se encuentran métodos que se basan en:

- Técnicas basadas en el procesado y estimación de la señal, la idea principal reside en detectar y regenerar la interferencia para posteriormente substraerla de la señal recibida.
- Técnicas de codificación para mitigar el efecto de la interferencia.

# Modelos de propagación y parámetros de simulación

Los modelos de propagación son las herramientas y métodos que se han usado para el estudio de las comunicaciones y especialmente para conseguir datos lo más exactos posibles acerca de las pérdidas que se producen en los distintos ambientes. Puesto que para cada escenario se utiliza un modelo dependiendo de si son entornos abiertos o cerrados, residenciales o comerciales, hogares u oficinas...y sobre todo dependiendo de las distancias entre los usuarios y las estaciones.

## Modelo Log-Normal

Este modelo tiene como base que no se centra en un entorno u otro, si no que las señales se transmiten en escenarios irregulares y tengan que pasar por procesos como difracción o por el reflejo en elementos del entorno considerados obstáculos para conseguir llegar al destino [19] [20]. Estas pérdidas pueden calcularse, en decibelios, de acuerdo a la siguiente ley:

$$L(dB) = L(d_o) + 10n \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + X_\sigma \quad (2)$$

Donde:

- n: exponente de propagación.
- $L(d_o)$ : base de las pérdidas.
- $X_\sigma$ : variable normal de media nula y desviación estándar  $\sigma$ .

PARAMETROS MODELO LOG-NORMAL			
Entorno	Frecuencia	N	$L(d_o)$
Espacio Libre	-	2	-
Urbano	1900	3.5	28
Urbano	1900	3.76	15.3
Edificio	1900	4.19	5.1
Oficinas	1900	3.7	12.8

Figura 26: Parámetros modelo Log-Normal.

## Modelo ITU P.1411

Este modelo se basa en escenarios exteriores para enlaces de corto alcance, entre 1 y 5 kilómetros. Para aquellos trayectos que cuenten con una distancia menor a 1 km, las pérdidas se concentran en abundancia [19] [20]. Este modelo define unos límites en cuanto a las pérdidas de propagación:

- Cálculo del límite inferior dependiendo de los valores de  $d$  (distancia) y  $R_{bp}$  :

$$L_{LoS,i} (dB) = L_{bp} + 20 \log \left( \frac{d}{R_{bp}} \right) \quad \text{for } d \leq R_{bp} \quad (3)$$

$$L_{LoS,i} (dB) = L_{bp} + 40 \log \left( \frac{d}{R_{bp}} \right) \quad \text{for } d > R_{bp}$$

- Cálculo del límite superior teniendo en cuenta las mismas condiciones del límite inferior:

$$L_{LoS,u} (dB) = L_{bp} + 20 + 25 \log \left( \frac{d}{R_{bp}} \right) \quad \text{for } d \leq R_{bp} \quad (4)$$

$$L_{LoS,u} (dB) = L_{bp} + 20 + 40 \log \left( \frac{d}{R_{bp}} \right) \quad \text{for } d > R_{bp}$$

Donde:

- $R_{bp}$  : punto de ruptura .Se calcula como:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (5)$$

- $L_{bp}$ : pérdidas básicas de transmisión. Para el modelo P.1411 se calculan como:

$$L_{bp}(dB) = \left| 20 \log \left( \frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \right| \quad (6)$$

- ❖  $\lambda$ : longitud de onda [ m ].
- ❖  $h_b$ : altura de la estación base respecto al nivel del suelo [ m ].
- ❖  $h_m$ : altura de la estación móvil respecto al nivel del suelo [ m ].
- ❖  $d$ : distancia entre estación base y estación móvil [ m ].

### Modelo ITU-R P.1238

Se centra en la realización de una estimación de las pérdidas entre los terminales para la planificación de los enlaces dados en entornos cerrados y con las distintas interferencias producidas por el inmobiliario de dentro del escenario, se representa en la estimación con el parámetro  $N$  [19] [20]. La fórmula para el cálculo de las pérdidas empleando este modelo es:

$$L_{total}(dB) = 20 \log(f) + N \log(d) + L_f(n) - 28 \quad (7)$$

Donde:

- $N$ : coeficiente de pérdida de potencia debido a los obstáculos.
- $f$ : frecuencia [ MHz ].
- $d$ : distancia entre las estaciones base y la del móvil, menores de 1 m.
- $L_f$ : factor de pérdidas por penetración en el suelo.
- $n$ : número de plantas entre las estaciones base y la del móvil.

## Modelo Cost231 – Okumura Hata

Este ha sido el modelo empleado para el estudio de este trabajo, se trata de un modelo empírico que trata de aproximar las pérdidas de propagación a las medidas reales tomadas en trabajos de campo en escenarios exteriores urbanos [19] [20]. La expresión en la que se rige este modelo para el cálculo de las pérdidas es la siguiente:

$$L (dB) = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) + (44.9 - 6.55 \log(h_b)) \log d - F(h_m) + C \quad (8)$$

Donde podemos especificar el parámetro  $F(h_m)$  en función del escenario utilizado:

$$F(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f)) - 0.8 \text{ en ciudades pequeñas y medianas} \quad (9)$$

$$F(h_m) = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 \text{ en ciudades grandes}$$

- $f$ : frecuencia [ MHz ].
- $d$ : distancia entre las estaciones base y la del móvil [ Km ].
- $h_b$ : altura de la estación base respecto al nivel del suelo [ m ].
- $h_m$ : altura de la estación móvil respecto al nivel del suelo [ m ].

Los resultados son considerados ciertos siempre y cuando se cumpla esta serie de condiciones:

- $150 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$
- $d \geq 1 \text{ Km}$
- $30 \text{ m} < h_b < 10 \text{ m}$
- $1 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m}$

## Estudio y Definición de las Reglas de Planificación

Se va a realizar un estudio de tipo heurístico y de simulación para poder contribuir en las reglas de planificación de los sistemas de comunicación. Seguiremos un escenario similar al planteado en las figuras 22, 23, 24 y 25 puesto que se trata de sectores.

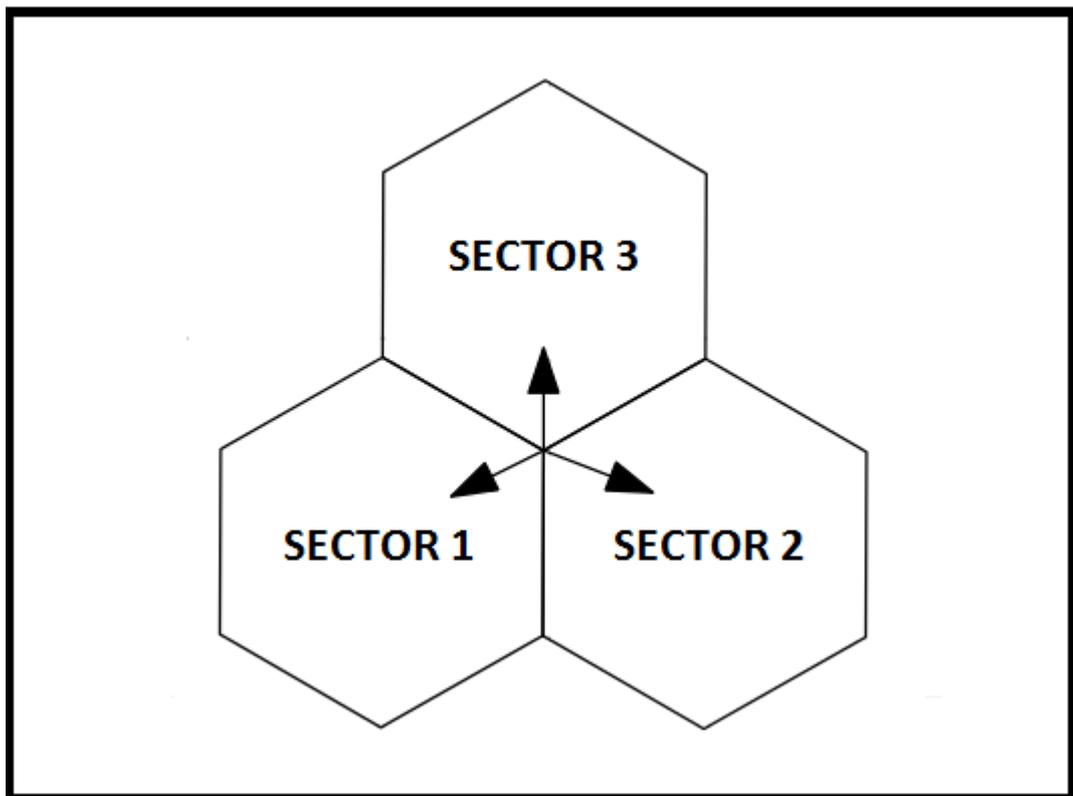


Figura 27: Modelo de reutilización empleado para el estudio, FRF 1.

Antes de comenzar el análisis, debemos destacar que no se ha elegido una forma hexagonal en la formación de la unión de las celdas, que sería lo natural, pensando en la posibilidad de poder llevar a cabo una sectorización. Además esta estructura ha sido elegida a propósito para poder facilitar una ulterior etapa de sectorización [20] [21].

Además, dividiremos nuestro estudio en dos casos diferentes, sectorizado o no sectorizado, tanto para el enlace ascendente como para el descendente.

Para el desarrollo del estudio tomamos las medidas de la figura 28 como referencia. Como podemos observar en las figuras de este análisis vamos a definir la posición tanto del UE como de los interferentes modificando sus coordenadas, es decir, multiplicando por un factor K que hará variar dicha posición tanto en el eje horizontal como en el vertical.

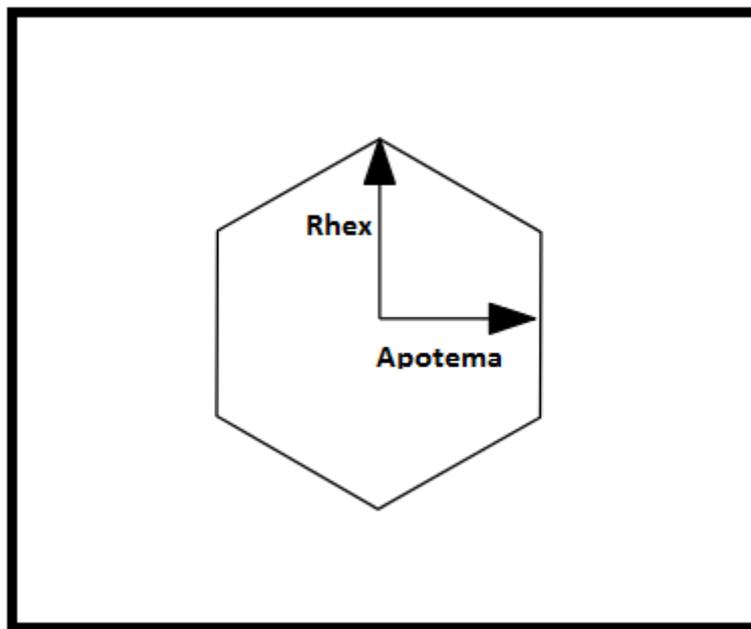


Figura 28: Medidas de referencia tanto para la colocación del UE como de los interferentes.

Vamos a centrar parte de nuestro estudio en el comportamiento del valor SINR como parámetro de calidad usado para definir si se obtiene buena señal o no. La fórmula por la cual se calcula este parámetro es:

$$SINR = \frac{\text{señal}}{(\text{interferencia} + \text{ruido})} \quad (10)$$

A la vez definiremos el factor de geometría celular (G) como la relación de potencia recibida entre el UE de la señal deseada y la potencia de los interferentes recibida.

$$G = \frac{P_{sc}}{P_{oc}} \quad (11)$$

Donde:

- $P_{sc}$ : potencia deseada (de la misma célula).
- $P_{oc}$ : potencia interferente (distintas células).

Suponiendo que las potencias medias emitidas por todas las células sean iguales y que la pérdida básica de propagación sigue leyes parecidas, el cociente por el cual se obtiene  $G$  depende únicamente de la geometría celular, pudiéndose calcular de este modo:

$$SINR = \frac{P_{SC}}{P_{OC} + P_N} = \frac{1}{G^{-1} + SNR^{-1}} \quad (12)$$

Siendo:

- SNR: relación de potencia de señal deseada a potencia de ruido térmico.

$$SNR = \frac{P_{SC}}{P_n} \quad (13)$$

- $P_N$  = potencia de ruido.

$$P_N = 1.38 * 10^{-23} * T_O * f_r * (N_{RB} * 180 * 10^3) \quad (14)$$

Donde:

- $T_O$ : temperatura de referencia (290 K).
- $f_r$ : factor de ruido del receptor.
- $N_{RB}$ : número de bloques de recursos.

De aquí podemos sacar como conclusión que cuando  $SINR < G$  estaremos en un escenario donde la geometría celular limita la SINR máxima que se puede obtener. Esta acotación es muy significativa puesto que la eficiencia dependerá del valor de SINR, por lo que si contamos con una  $G$  pequeña también lo será SINR y por ello el caudal de tráfico será reducido.

El objetivo de LTE, como anteriormente hemos estudiado, consiste en alcanzar tasas de bits elevadas manteniendo una alta eficiencia, sin embargo, este exceso de reutilización puede llegar a ser gravemente perjudicial en los bordes de las células donde se generaría una interferencia elevada e implicaría una reducción del factor G, y por ello, a su vez afectaría al valor de SINR limitando la tasa de conectividad. Por ello, en nuestro estudio vamos a diferenciar bien la posición de la célula en la cual nos encontramos, diferenciando las zonas correspondientes al borde o al centro de la misma.

Cabe destacar otro de los parámetros estudiados, la sensibilidad (S). La sensibilidad o potencia mínima de recepción se calcula en función de la SINR. Hay que diferenciar dos métodos de cálculo de esta variable:

- Sensibilidad caracterizada al margen de interferencia:

$$S = P_{SC} = SINR * P_N * NFR \quad (15)$$

$$S(dBm) = -121.5 + F_R + 10 * \log N_{RB} + NFR + SINR \quad (16)$$

Donde:

- $m_i$  : margen de interferencia, también conocido como NFR (Noise Floor Raise).

$$m_i = NFR = \frac{P_{OC} + P_N}{P_N} \quad (17)$$

- Cálculo de la S empleando la geometría celular:

$$S = P_n * SINR \left(1 - \frac{SINR}{G}\right)^{-1} \quad (18)$$

$$S(dBm) = -12.5 + F_R + 10 * \log N_{RB} + SINR - 10 \log \left(1 - \frac{SINR}{G}\right) \quad (19)$$

El valor de S obtenido debe ser contrastado con lo establecido en las especificaciones establecidas por LTE para verificar su validez, siendo válido siempre que la sensibilidad obtenida sea igual o menor que la especificada en el estándar.

## Sentido UL

Para el cálculo de los siguientes valores de SINR en función de la distancia del UE con respecto al centro de la celda, hemos aplicado las siguientes fórmulas y procedimiento [20]:

1. Situamos el UE, de manera que se vaya acercando al centro del trisector progresivamente. En la figura 29 podemos observar el trisector amarillo marcando la posición inicial del UE y la dirección en la cual se va a ir desplazando.
2. Situamos seis interferentes alrededor del UE, uno por cada trisector, de manera aleatoria. Representado en la figura 29 mediante los puntos de color verde.

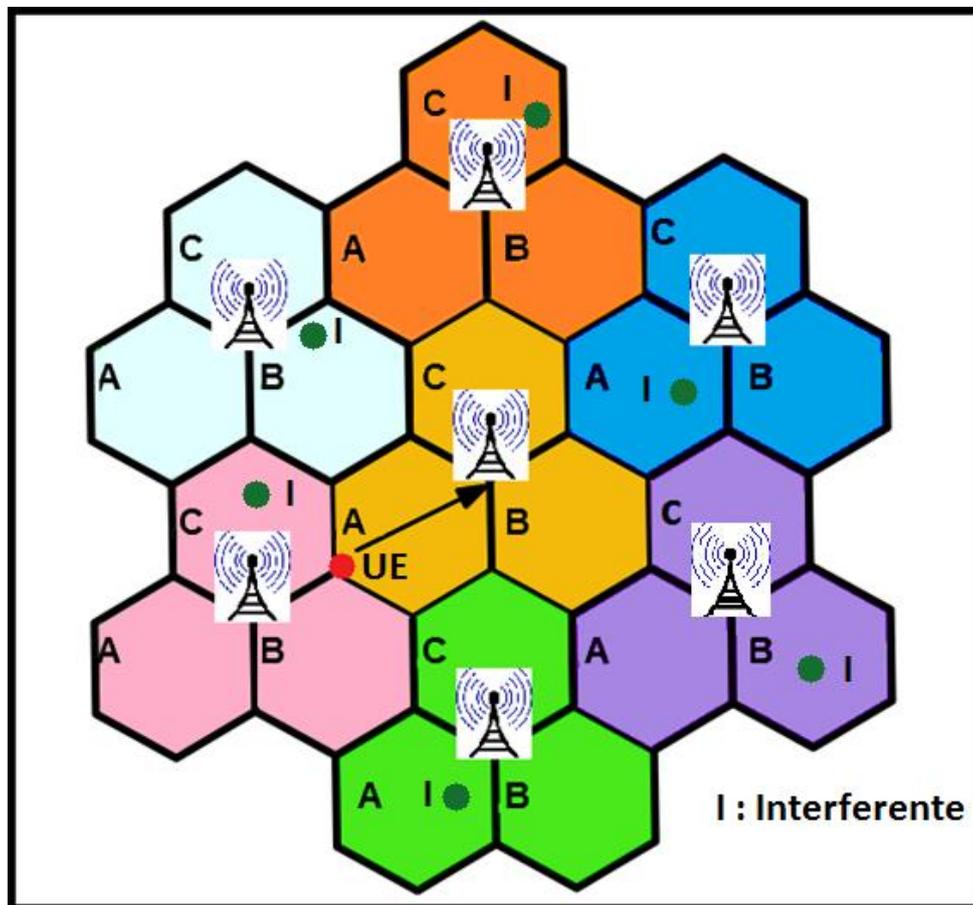


Figura 29: Representación del escenario creado para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace ascendente.

3. Definimos los valores que van a ser fijos en nuestro estudio:
  - Figura del sistema del receptor= 7 dB.
  - Sigma= 7.
  - Frecuencia= 3000 MHz.
  - Altura de la base de la antena= 30 m.
  - Altura del móvil= 1.5 m.
  - Potencia e transmisión del eNB= 46 dBm.
  - Fracción de potencia destinada a tráfico,  $\beta_{UL}$ = 0.75.
  - Figura de ruido eNodoB= 2 dB.
  - Pérdidas del cable de eNodoB= 2 dB.
  - Ganancia\_UL= 18 dBi.
  - Figura de ruido del receptor= 0 dB.
  - Potencia transmitida por el UE en el UL= 24 dB.
  
4. Cálculo de la potencia de ruido térmico en la estación base del receptor:  $P_N$ .
  
5. Cálculo de NFR obteniendo un valor aproximado a 5 dB.
  
6. Cálculo de la sensibilidad empleando la geometría. En la TS.36.101 (norma en la que se especifican las características de radiofrecuencia para el UE), se dan valores de referencia para diferentes clases de estaciones base y anchuras de banda.

### Modelo no sectorizado

El modelo **no** sectorizado hace referencia a que todos los trisectores de alrededor del UE van a interferir en la transmisión del mismo. Por ello, no afectará hacia que ángulos apunten los sectores de la estación base.

En la siguiente figura podemos observar el comportamiento del valor de SINR en función de la distancia, estudiando la región interés y de este modo poder calcular los valores de SINR "aceptables".

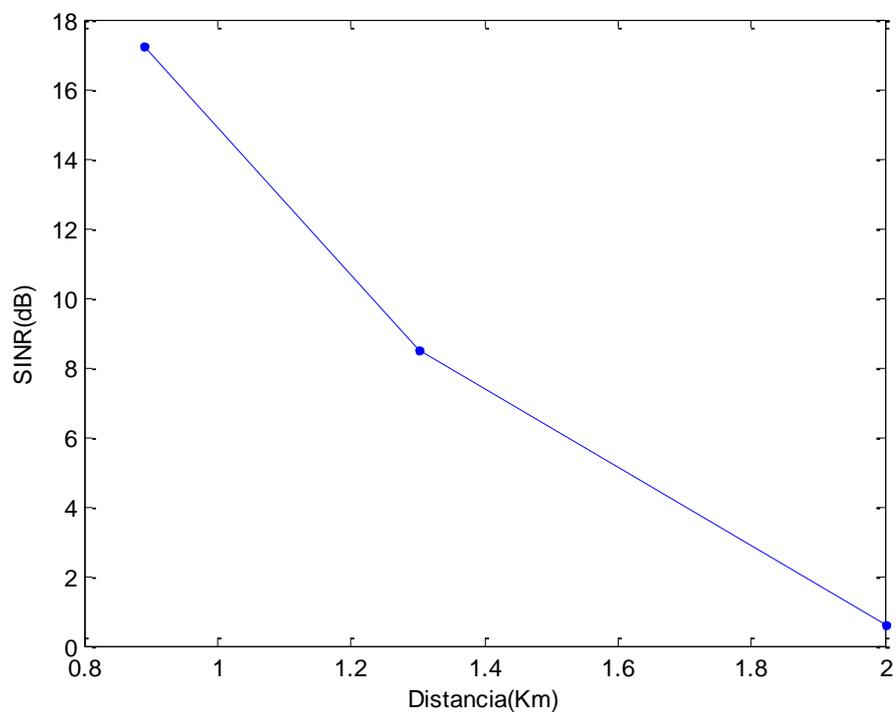


Figura 30: Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido ascendente en el modelo no sectorizado.

A la vista de los resultados podemos afirmar que lo obtenido corresponde con los conocimientos teóricos, puesto que a medida que el UE se va acercando al centro de la celda, la distancia con la base disminuye, obtendremos mejor valor de SINR por lo cual contaremos con una mejor calidad a la hora de comunicarnos.

De ahí, que en las ecuaciones 16 y 19 se destaque la importancia del conocimiento de la subida de ruido y el comportamiento según la posición del UE en la celda.

En cuanto a la subida de ruido, podemos observar que obtendremos el siguiente valor:

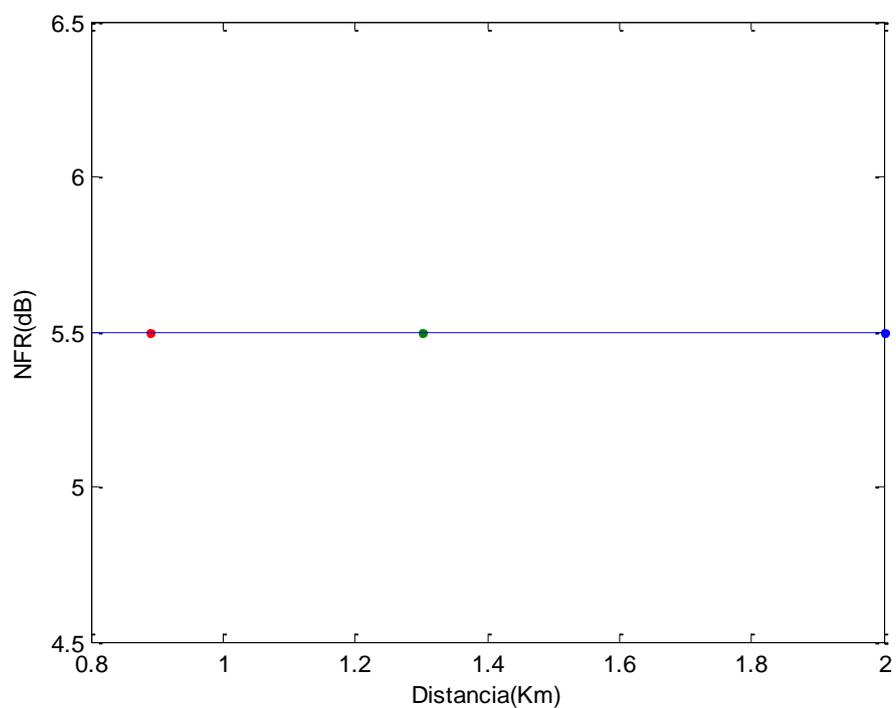


Figura 31: Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace ascendente en el modelo no sectorizado.

## Modelo sectorizado

Como podemos observar en la siguiente figura, realizamos una sectorización en función de la posición en la que se encuentra el UE. En concreto, dividiremos nuestro escenario de tal modo que la estación base por la cual se comunica nuestro UE divise  $120^\circ$  y de ahí podamos incluir como interferentes unos trisectores u otros. Según podemos observar en la figura 32, incluiremos como interferentes a los usuarios que se encuentre en los trisectores verde, rosa y azul claro.

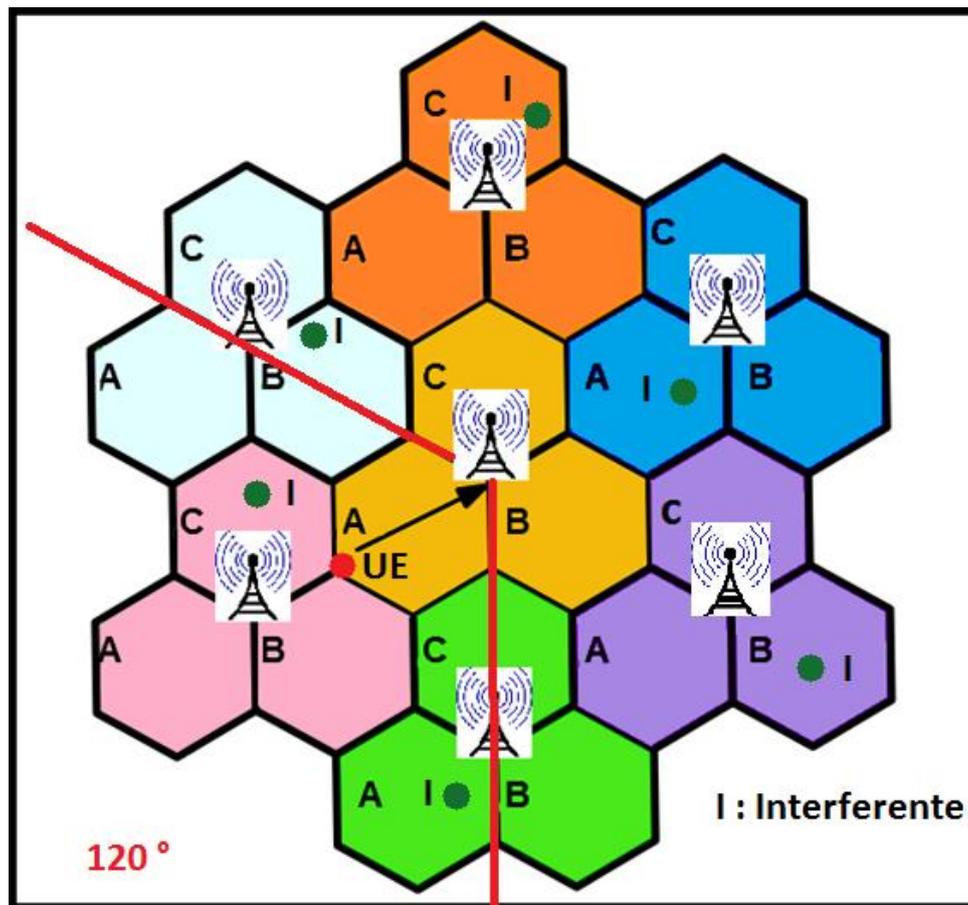


Figura 32: Escenario del modelo sectorizado en el enlace ascendente.

En este caso, obtendremos estos valores para el parámetro SINR:

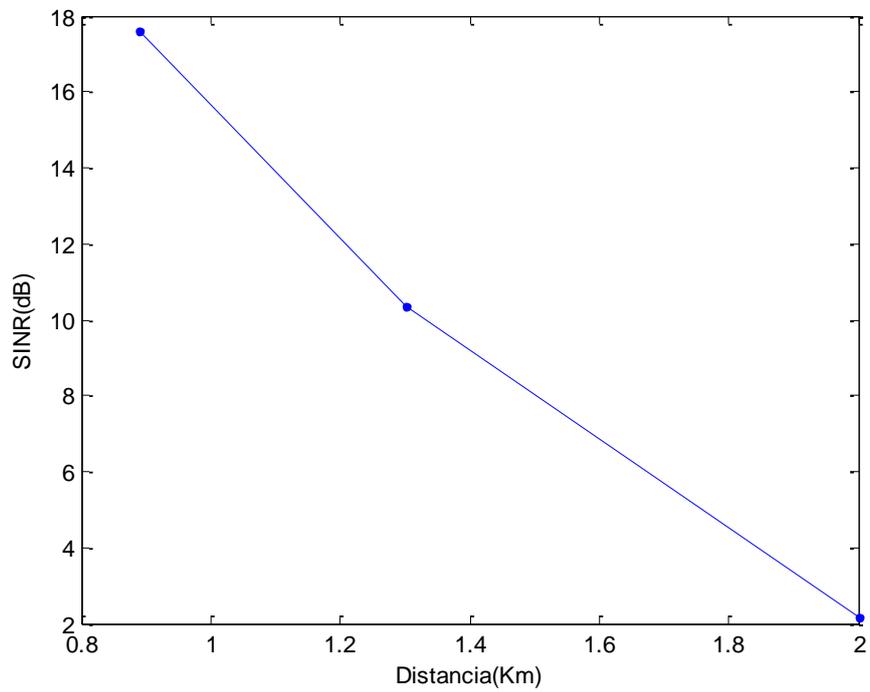


Figura 33: Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido ascendente en el modelo sectorizado.

Y como valores obtenidos de NFR obtenemos:

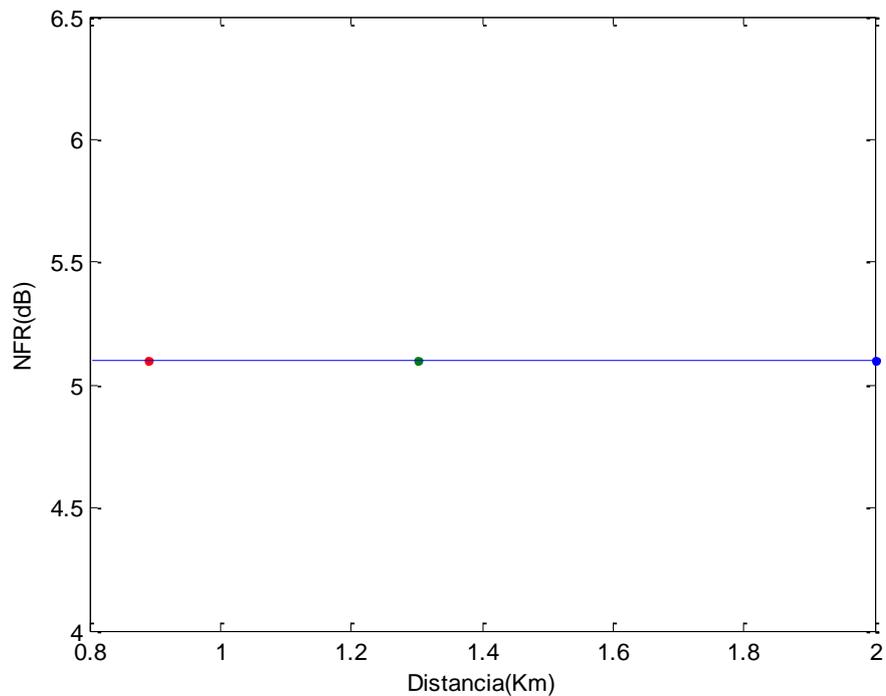


Figura 34: Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace ascendente en el modelo sectorizado.

## Sentido DL

Para el análisis del sentido descendente, emplearemos una táctica parecida, únicamente variaremos aquellos parámetros en los que se distingue con el UL. Al igual que anteriormente se van a exponer las fórmulas y el procedimiento empleado:

Al igual que para el enlace ascendente, diferenciaremos dos modelos de estudio: no sectorizado y sectorizado.

En primer lugar definimos el escenario empleado en la figura 35, donde podemos observar seis trisectores pertenecientes a los interferentes y además un trisector, el amarillo, en el cual se encuentra situado el UE, en concreto, en la celda A. El UE se va a ir desplazando según el sentido de la flecha hacia la estación base, donde de esa manera podremos limitar una región que suponemos ideal en cuanto a obtener los mejores valores de SINR:

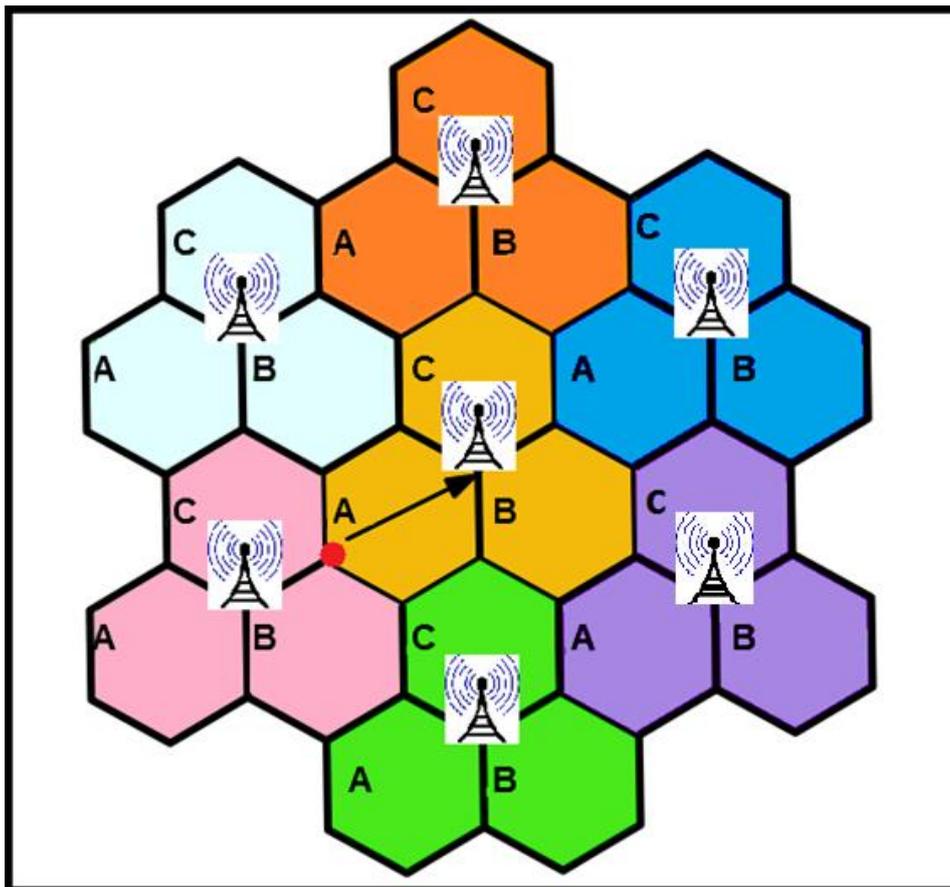


Figura 35: Representación del escenario creado para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace descendente en el modelo no sectorizado.

En segundo lugar vamos a definir los cálculos correspondientes para la realización del estudio:

1. Definimos la posición de los interferentes, como referencia, se elige el centro de los trisectores en donde se encuentran las estaciones bases.
2. Definición de los valores que van a permanecer fijos en nuestro estudio:
  - Figura del sistema del receptor= 7 dB.
  - Sigma= 7.
  - Frecuencia= 3000 MHz.
  - Altura de la base de la antena= 30 m.
  - Altura del móvil= 1.5 m.
  - Factor de ruido del sistema sentido DL= 7 dB.
  - Potencia e transmisión del eNB= 46 dBm.
  - Fracción de potencia destinada a tráfico,  $\beta_{DL}$ = 0.85.
  - Número de RB utilizados = 2.
  - Sumatorio Ganancia= 18 dBi.
  - Ganancia antena tx= 0 dB.
  - Perdidas del cable de la antena transmisora= 2 dB.

3. Cálculo del ruido térmico en recepción:

$$P_N = -174 + \text{Factor de ruido del sistema} + 10 * \log(BW(\text{Hz})) \quad (20)$$

4. Cálculo del parámetro NFR, observamos en las figura 36, 38 y 40 que aparentemente permanece un valor constante debido a que lo que le afecta es la distancia del UE al centro y no la de los interferentes:

$$NFR = \frac{P_N + I_{ext}}{P_N} \quad (21)$$

5. Cálculo de la sensibilidad:

$$S = P_N + NFR \quad (22)$$

6. Por último, calculamos el valor de SINR.

### Modelo no sectorizado

En la anterior figura veíamos el comportamiento que va a realizar el UE en nuestro estudio, en la siguiente figura (Figura 36) veremos el comportamiento de los interferentes. Los interferentes transmitirán hacia sus estaciones bases y estas serán las que afecten al UE como podemos observar en la siguiente figura:

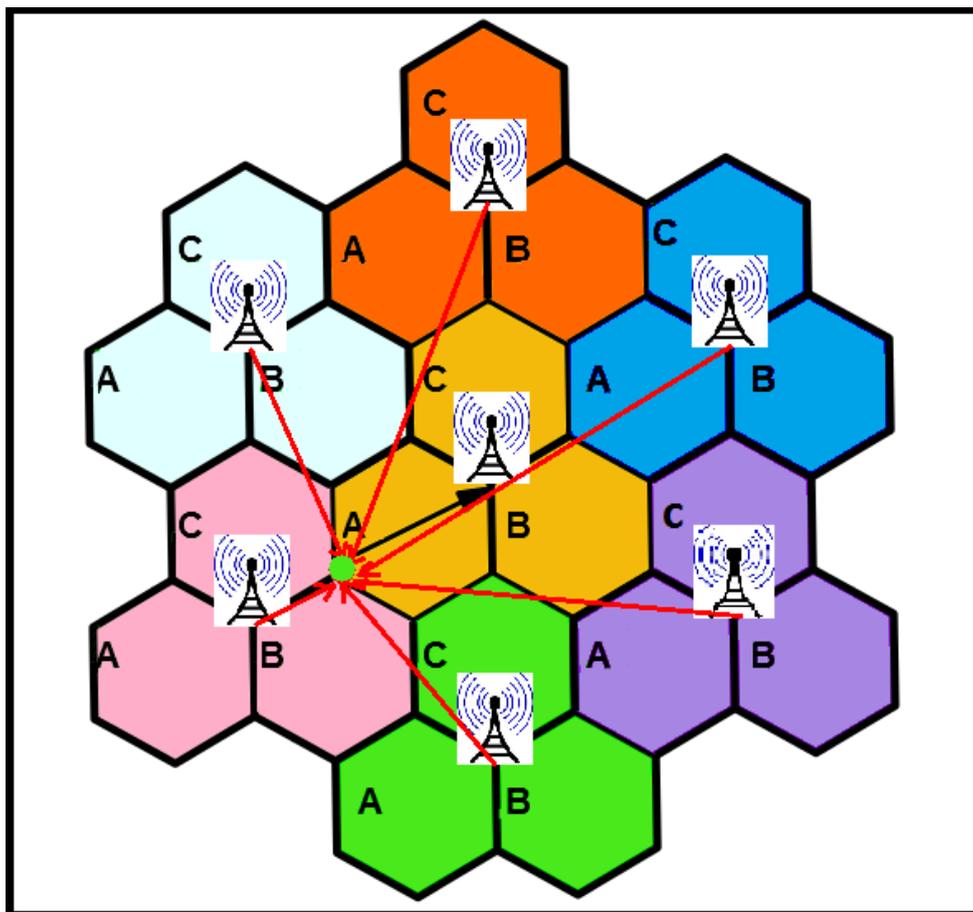
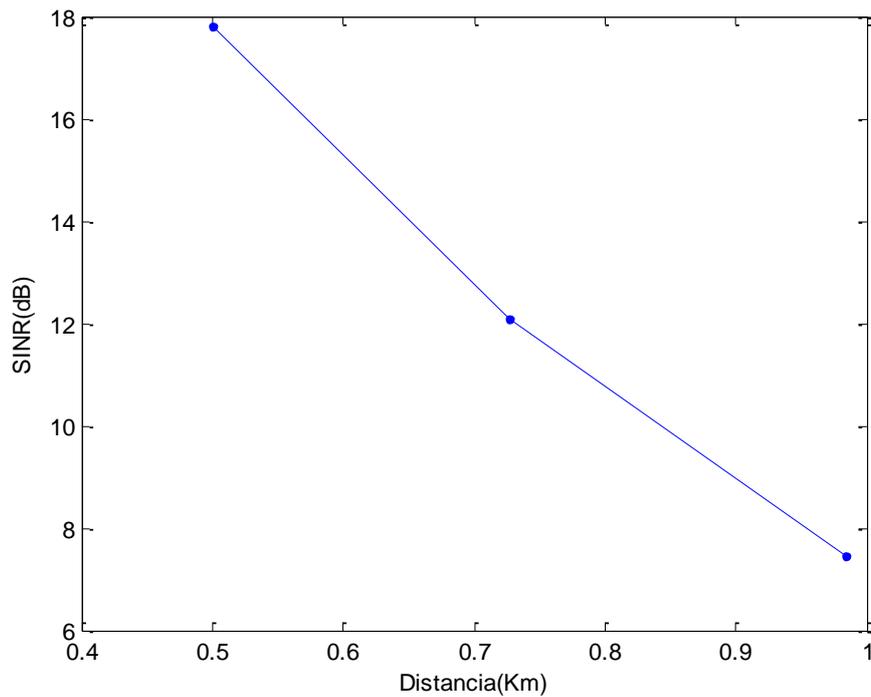


Figura 36: Representación del escenario de la actuación de los interferentes para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace descendente en el modelo no sectorizado.

En esta simulación calculamos la señal perteneciente al UE y el sumatorio de las señales procedentes de los seis trisectores interferentes que rodean al UE. A continuación, procedemos a comparar los resultados teniendo como característica principal el parámetro de la distancia con respecto al UE.



**Figura 37:** Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido descendente en el modelo no sectorizado.

Como estudio de la calidad de la señal transmitida, se puede observar en el figura 37 la curva obtenida como resultado del análisis de la SINR, en la cual nos muestra que a menor distancia entre el usuario y el centro de la celda, mejor será la señal puesto que tendrá mayor potencia para la comunicación y la actuación de los interferentes será de menor importancia.

Además, en la figura 38 podemos observar el comportamiento del valor de NFR para este escenario.

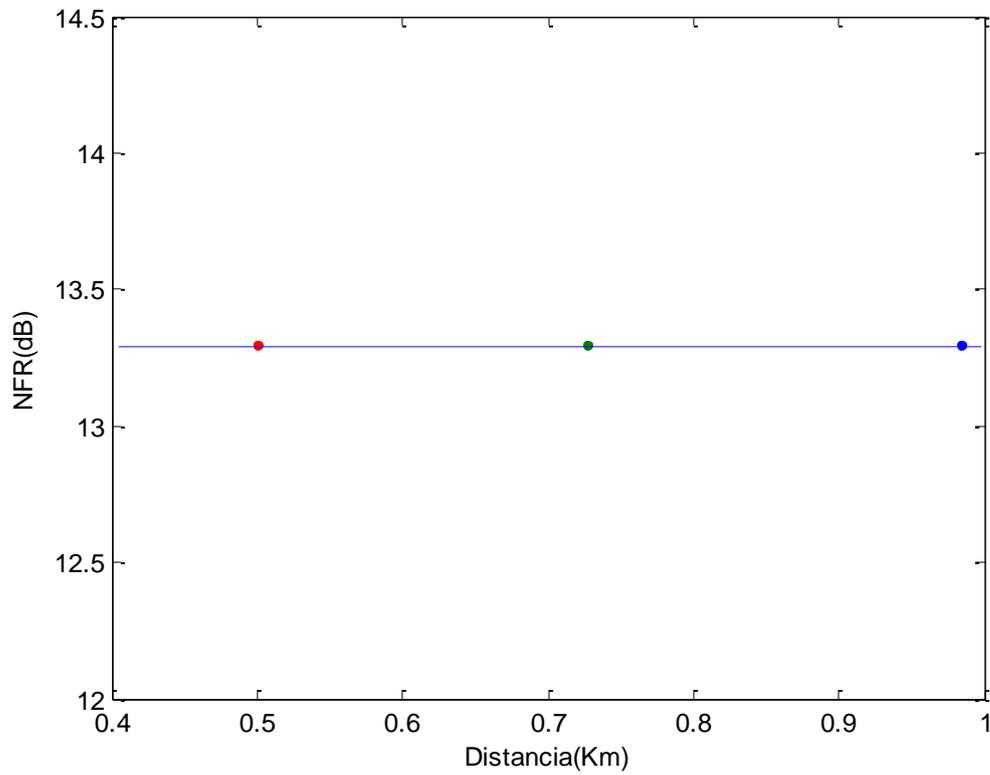


Figura 38: Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace descendente en el modelo no sectorizado.

## Modelo sectorizado

En este caso, nuestra sectorización será con respecto a los ángulos de las estaciones bases, como podemos observar la figura 39 únicamente nos afectarán esos 4 trisectores, puesto que el resto de trisectores no contendrán ningún sector orientado hacia el UE según la siguiente asignación de orientación de las antenas:

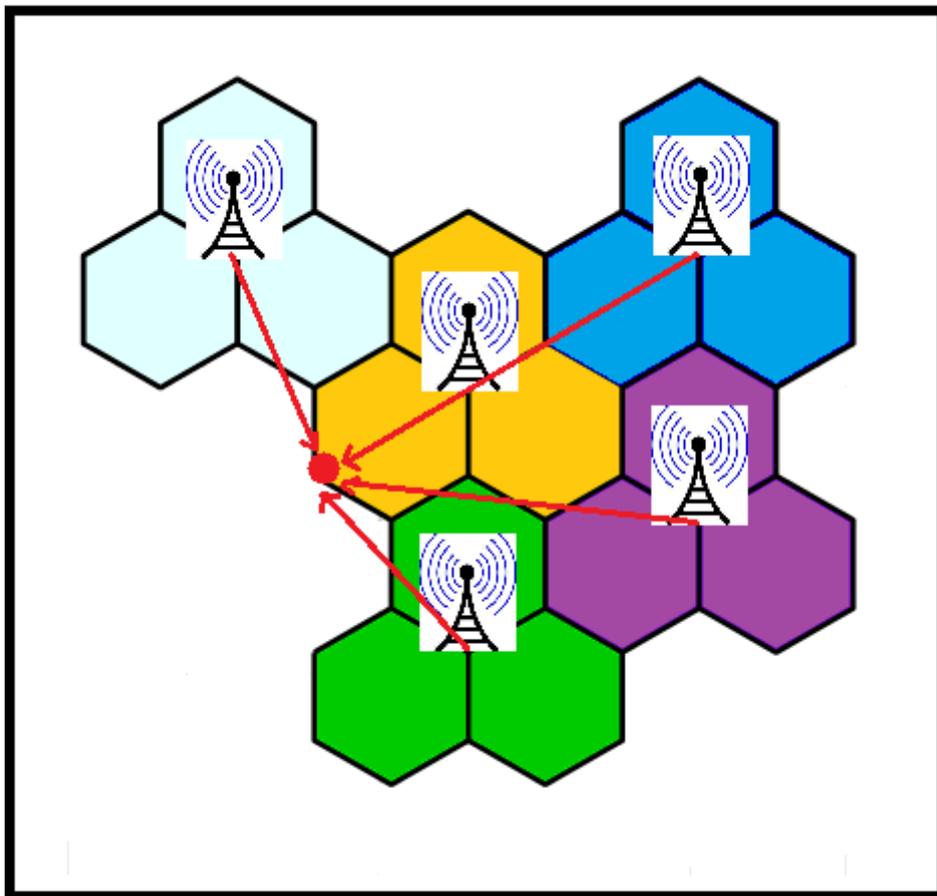
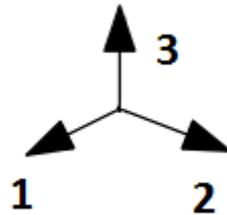


Figura 39: Representación del escenario de la actuación de los interferentes para el estudio de la SINR y del NFR en el enlace descendente en el modelo sectorizado.

Podemos observar los resultados obtenidos de la SINR en la siguiente figura:

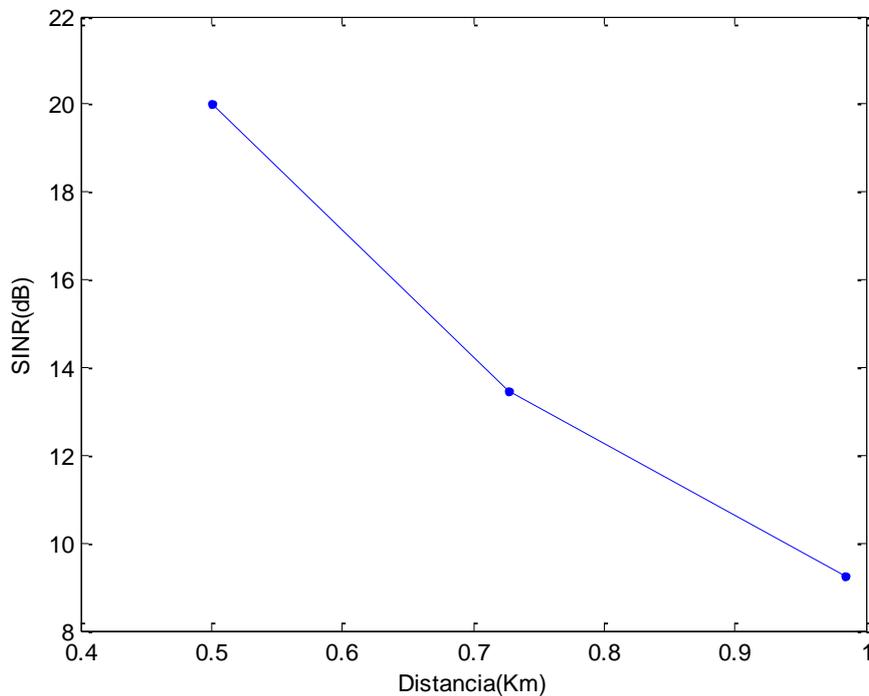


Figura 40: Cálculo de la SINR en unidades logarítmicas frente a la distancia medida en Km entre el UE y los interferentes en el sentido descendente en el modelo sectorizado.

Del mismo modo observamos los valores del NFR en este escenario:

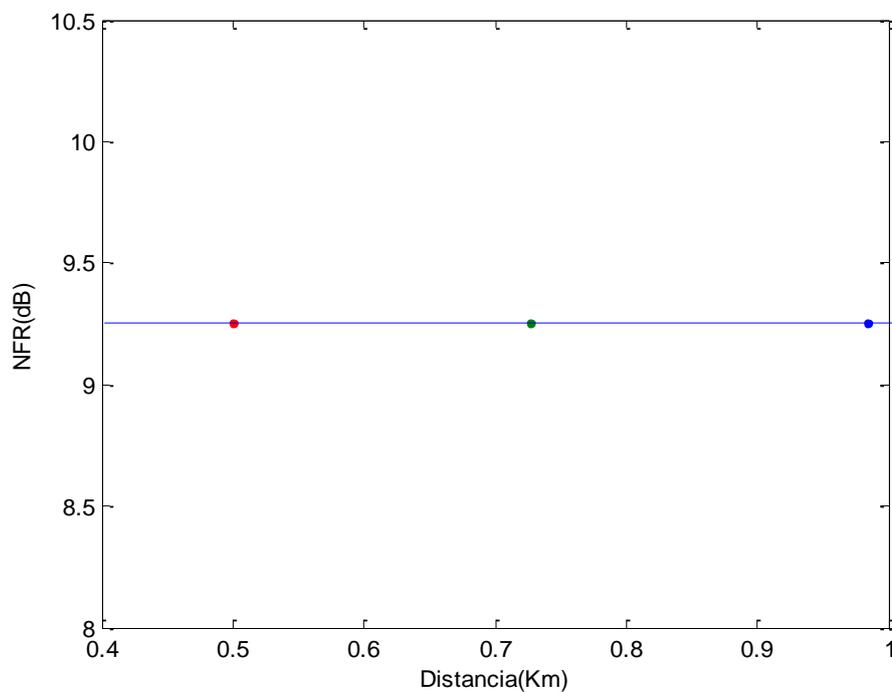


Figura 41: Valor simulado de NFR correspondiente a la transmisión del UE frente a los interferentes en el enlace descendente en el modelo sectorizado.

# Conclusiones

## Conclusiones generales

En este punto se va a llevar a cabo una breve descripción y una valoración de las conclusiones extraídas del trabajo desarrollado durante la realización del mismo.

En primer lugar, decir que lo más importante del desarrollo del análisis ha sido el parámetro de la distancia, puesto que en función de la misma se obtienen unos resultados u otros. De igual modo, otro parámetro fundamental en el desarrollo del mismo, fue la elección del tamaño del radio de los hexágonos que representan las celdas, se eligió el valor de 1 Km por ofrecer un buen compromiso en el balance propagación-tráfico ofrecido.

En cuanto al estudio del parámetro SINR, observamos tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente, podemos estimar que todos los resultados obtenidos son “razonables”, puesto que a medida que aumenta la distancia la calidad será menor y por ello el valor de SINR disminuirá considerablemente. En concreto definiremos ciertos márgenes para los cuales asignaremos una región u otra:

- Margen superior: para cuando  $SINR > 20$  dB estaremos en el escenario en el cual nuestra comunicación está libre de interferencias.
- Margen inferior: si  $SINR < 8$  dB podemos considerar que se puede planificar en todos los PRBs.

Además, apreciamos en cada uno de los dos sentidos del enlace, que en aquel en el cual empleamos el modelo sectorizado obtenemos mejores valores de SINR. Lo vamos a observar mejor en la siguiente tabla en donde lo comparamos en función de la distancia. Donde la distancia ( $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ ) va a ser el trayecto que va a tener que realizar la señal del UE para transmitir a su estación base, distintas distancias puesto que como comentamos anteriormente el UE va a ir acercándose hacia la estación base.

SINR (dB)				
UL		d1=0.88 Km	d2=1.3 Km	d3=2 Km
	No Sectorizado	17,22	8,48	0,62
	Sectorizado	17,59	10,32	2,18

SINR (dB)				
DL		d1= 0.5 Km	d2= 0.72 Km	d3= 0.98 Km
	No Sectorizado	17,80	12,09	7,45
	Sectorizado	20,07	13,46	9,25

Tabla 1: Conclusiones de los valores SINR obtenidos en los enlaces ascendentes y descendentes.

En cuanto al cálculo y el comportamiento de la subida de ruido lo podemos observar en la siguiente tabla, donde para el enlace ascendente tiene un valor alrededor de 5,3 dB (5.5 modelo no sectorizado y 5,1 modelo sectorizado), mientras que para el enlace descendente (10,59 modelo no sectorizado y 9,303 modelo sectorizado) observamos que también permanece un valor constante para ambos modelos (no sectorizado y sectorizado), pero mayor en el DL puesto que los interferentes afectarán en mayor medida. En lo referente a obtener un valor constante, es debido a que lo que le afecta a la subida de ruido es la distancia del UE al centro y no la de los interferentes.

NFR (dB)		
UL	No Sectorizado	5,5
	Sectorizado	5,1

NFR (dB)		
DL	No Sectorizado	10,59
	Sectorizado	9,30

Tabla 2: Conclusiones de los valores NFR obtenidos en los enlaces ascendentes y descendentes.

También sacamos como conclusión tras varias pruebas, que para distintos tamaños de celda el valor de NFR cambia de valor pero sin embargo seguirá siendo constante para las distintas distancias.

Destacar que hemos sacado una aproximación de las distintas áreas en donde el UE recibirá mejor señal como podemos observar en la figura de a continuación:

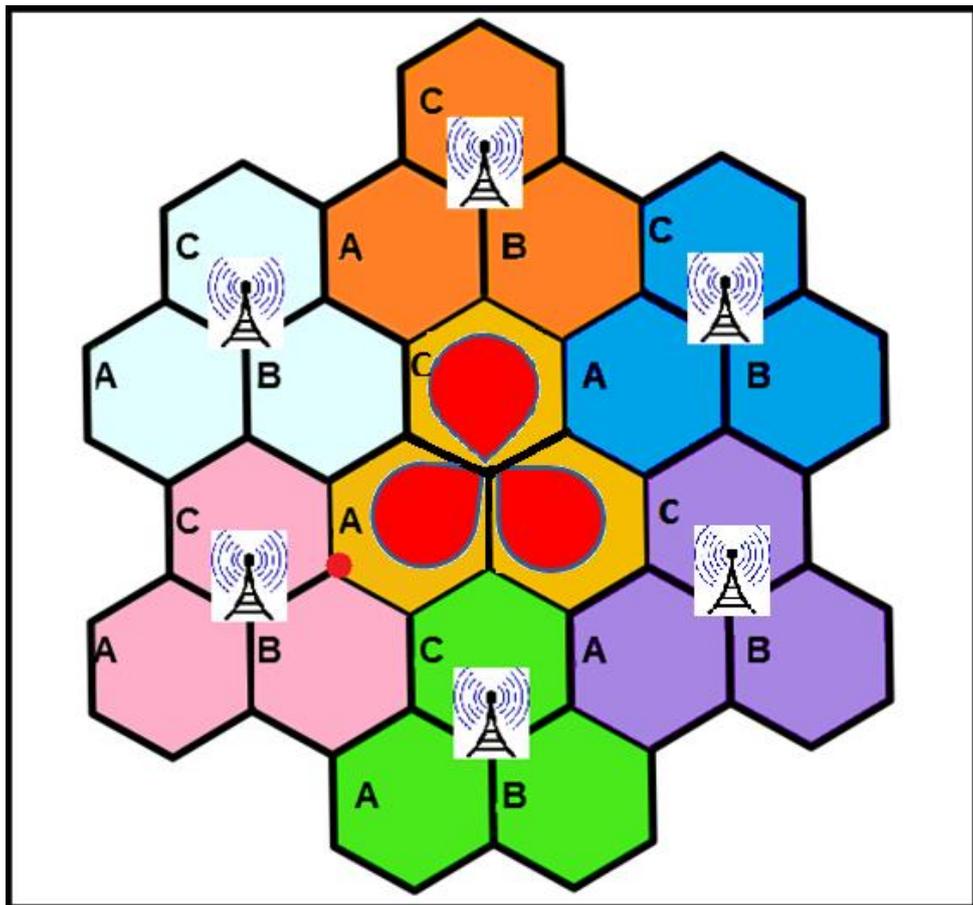


Figura 42: Áreas de mayor recepción de señal.

## Líneas de investigación futura

En esta sección se va a tratar de plantear las posibles mejoras o ampliaciones para el sistema estudiado en este trabajo:

- Seguir estudiando en el camino de poder integrar las comunicaciones móviles con las fijas para poder llegar a conseguir un grado de conectividad mayor.
- Añadir las técnicas MIMO al sistema actual.
- Poder aplicar este estudio en un escenario real y conseguir mayor información sobre el comportamiento de los móviles para llegar algún día a eliminar la interferencia.

## Retos superados

El aprendizaje durante el proyecto no ha sido de manera abrupta, gracias a las asignaturas de: Planificación de Redes de Comunicaciones Inalámbricas y Comunicaciones Móviles, cursadas durante el transcurso de la carrera comenzó mi conocimiento sobre este ramal de las telecomunicaciones. Por ello, mi conocimiento sobre el sistema de comunicaciones LTE no era escaso, o eso creía.

La primera dificultad con la que me he topado ha sido en la búsqueda de la información, puesto que la información era muy redundante y en la mayoría de los casos con un lenguaje muy ambiguo, especialmente el empleado en los estándares.

Antes de empezar con el desarrollo del software en MATLAB, decidí hacer un análisis en papel con la idea de identificar bien cada una de las fórmulas y principalmente sus unidades, aspecto en el cual tuve algunos problemas.

En tercer lugar, otro asunto en el que he adquirido conocimientos ha sido en el uso del programa MATLAB, puesto que mis conocimientos sobre el lenguaje empleado en el software eran limitados. A base de leer manuales y de “pegarme” con él, he conseguido sacar adelante el trabajo. Principalmente tuve dificultades a la hora de realizar los bucles y a la hora de compaginar unas variables con otras.

También el uso del programa IPE a la hora de realizar todas las figuras para así poder comprender mejor el estudio.

Por último, aunque parecía obvio que supiese utilizar el programa Microsoft Word he tenido que actualizar mis conocimientos para poder realizar esta memoria con mayor soltura.

# Gestión del Proyecto

El proyecto se inició en el mes de Enero del 2014 y ha sido realizado durante 9 meses hasta finalizarlo en Septiembre de 2014. A continuación, en la siguiente figura se representan las distintas fases del proyecto y la duración de cada una de ellas.

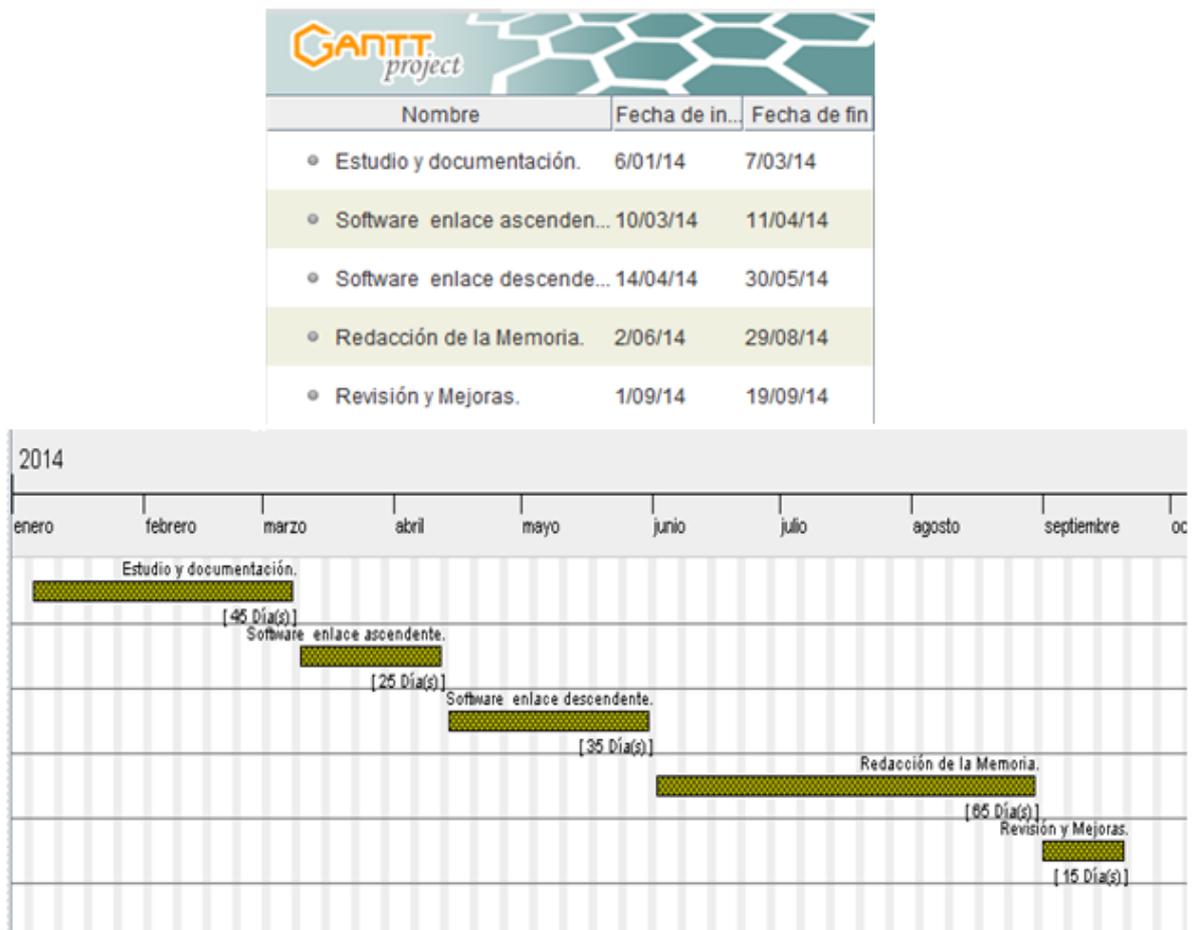


Figura 43: Representación del diagrama de GANTT.

# Presupuesto

## Presupuesto TFG

### AUTOR

Javier de Tomás Villamayor

### Centro

Universidad Carlos III de Madrid

### Departamento

Teoría de la señal y comunicaciones

### Título del TFG

Evaluación del suelo de ruido por interferencia cocanal para planificación LTE

### Duración

9 meses

### Desglose de costes del TFG

COSTE DE PERSONAL				
Categoría	Salario bruto mensual	Salario neto mensual*	Dedicación	Coste
Ingeniero senior	4.166,166 €	2.990,80 €	9 meses	26.917,2 €
Ingeniero junior	2.000 €	1.553 €	9 meses	13.977 €
<b>COSTE TOTAL</b>				<b>40.894,2 €</b>

\*Retención de IRPF y Seguridad Social

Tabla 3: Costes de personal.

COSTE DE EQUIPOS				
Descripción	Coste	Dedicación	Periodo de depreciación	Coste de amortización
Ordenador portátil	650 €	6 meses	60 meses	65 €
Licencia de Matlab	2000 €	6 meses	60 meses	200 €
<b>COSTE TOTAL</b>		<b>2650 €</b>		<b>265 €</b>

Tabla 4: Costes de equipos.

RESUMEN DE COSTES	
Costes de personal	<b>40.894,2 €</b>
Costes de amortización	<b>265 €</b>
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>41.159,2 €</b>

## Opinión Personal

Con este trabajo he aprendido más sobre las comunicaciones móviles, especialmente sobre LTE, es decir, sobre el futuro.

Este estudio me ha aportado mayor conocimiento sobre cómo funcionan las nuevas metodologías para combatir la interferencia de los usuarios y que técnicas se siguen para ello.

También me satisface haber podido llevar a cabo un trabajo en el cual he tenido la oportunidad de probar y de vivir de primera mano puesto que he realizado prácticas en una empresa en la cual se trataban temas de interferencia.

Por último, destacar que la elección de este proyecto orientado a las comunicaciones móviles fue una apuesta, por el hecho de que no tenía claro hacia que rama orientar mi futuro, y desde luego puedo decir que el sector de las comunicaciones ha captado mi atención y mis ganas de seguir mi experiencia laboral en él.

## Bibliografía

- [1] Evelio Martínez, *Evolución de la Tecnología Celular*, Revista NET, 2001.
- [2] S. Kumar, *Fourth Generation of Mobile Communication Systems: Evolution, Objectives, Prospects and Challenges*, Conferencia, Noviembre, 2009.
- [3] Z. Abichar, M. Chang y C. Hsu, *WIMAX vs LTE. Who Will Lead the Broadband Mobile Internet?*, IEEE Mobile Computing, Libro, Junio, 2010.
- [4] Página WEB: WIMAX Forum en: [www.wimaxforum.com](http://www.wimaxforum.com) (último acceso. Agosto 2014)
- [5] R. Nossenson, *Long-Term Evolution network Architecture*", Libro, 2009.
- [6] Raquel Pérez, Víctor Pedro GIL, *Documentación asignatura Comunicaciones Móviles*, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal, Curso 2012/2013
- [7] Ramón Agusti y otros, *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*, Fundación Vodafone España, Libro, 2010.
- [8] H. Holma and A.Toskala, Jhon Whisley & Sons, *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, Libro, 2009.
- [9] Ian Poole, *LTE FDD, TDD, TD-LTE Duplex Schemes*, Artículo, Radio-Electronics, 2011.  
Página WEB: [www.radio-electronics.com](http://www.radio-electronics.com) (último acceso. Septiembre 2014)
- [10] Ian Poole, *LTE MIMO: Multiple Input Multiple Output*, Radio-Electronics, Artículo, 2011.  
Página WEB: [www.radio-electronics.com](http://www.radio-electronics.com) (último acceso. Septiembre 2014)
- [11] 3GPP, *Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 9)*, 3gpp, Technical Report TR 36.916, 2004.
- [12] 3GPP TS, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA): Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 12)*, Diciembre, 2013.
- [13] Página WEB: Informe sobre las Femtoceldas en: [www.wikitel.info.com](http://www.wikitel.info.com) (último acceso. Agosto 2014)
- [14] Manish Singh, *Top ten challenges to Femtocell deployment*, Marzo, 2008.
- [15] Vikram Chandrasekhar y Jeffrey G. Andrews, *Femtocell Networks: A Survey*, Universidad de Texas, Junio, 2008.

- [16] Edgar Alfonso Cipagauta y Roberto Ferro, *SISTEMAS MULTIMEDIA BASADOS EN PROTOCOLO IP IMS APLICADOS A SERVICIOS LTE DE 4G*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Documentación, Agosto, 2012.
- [17] Jorge Cabrejas, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Libro, Abril, 2011.
- [18] Adnan Basir, *ICIC*, Artículo, Junio, 2012.
- [19] Telefónica, *LTE: Long Term Evolution*, EUIT de Telecomunicación UPM, 2012.
- [20] Ángel María Bravo, Documentación asignatura Planificación de Redes de Comunicaciones Inalámbricas, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal, Curso 2012/2013.
- [21] Florin Sandu, *Simulation of LTE Signaling*, Artículo, 2010.
- [22] 3GPP TS 36.201 V12.0 Release 12, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description, Dic. 2013
- [23] 3GPP TS 36.201 V12.0 Release 12, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Architecture description, Dic. 2013
- [24] Página WEB: Especificaciones 3GPP en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.html> (último acceso. Septiembre 2014)