

ALGORITMO DE REÚSO DE FRECUENCIA PARA EL SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE



María Manuela Silva Zambrano
Valentina Giselle Moreno Parra

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, 2015

ALGORITMO DE REÚSO DE FRECUENCIA PARA EL SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

María Manuela Silva Zambrano
Valentina Giselle Moreno Parra

Directora: Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, 2015



TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. REQUERIMIENTOS DE LTE	2
1.3. GENERALIDADES LTE	3
1.4. ARQUITECTURA DE LTE	4
1.4.1. Equipo de Usuario	5
1.4.2. Red de Acceso E-UTRAN	6
1.4.3. Núcleo de Red EPC.....	7
1.5. CARACTERÍSTICAS DE LTE	9
1.5.1. Bloque de Recursos Físicos	10
1.5.2. Estrategia de Planificación de Paquetes	10
1.5.3. Ancho de Banda Variable	11
1.5.4. Diversidad Espacial	11
1.6. OFDM.....	12
1.7. OFDMA	16
1.8. INTERFERENCIA INTER-CELDA	17
1.9. TÉCNICAS DE REÚSO DE FRECUENCIA	19
1.9.1. Reúso de Frecuencia Universal.....	19
1.9.2. Reúso de Frecuencia Duro	20
1.9.3. Reúso de Frecuencia Suave	21
1.9.4. Reúso de Frecuencia Parcial.....	23
1.9.5. Reúso de Frecuencia Fraccional	24
1.9.6. Reúso de Frecuencia Incremental	28
1.9.7. Reúso de Frecuencia Cooperativo	29
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE DESARROLLO	31
2.1. INTRODUCCIÓN.....	31
2.2. REQUERIMIENTOS.....	32
2.2.1. Problema de Estudio	32
2.2.2. Requerimientos Funcionales	32
2.2.3. Requerimientos No Funcionales	33
2.3. DISEÑO.....	33



2.3.1. Selección de las Técnicas de Reúso de Frecuencia	33
2.3.2. Definición del Modelo del Sistema.....	34
2.3.3. Algoritmos del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE	36
2.4. IMPLEMENTACIÓN	40
2.4.1. Herramienta de Simulación	40
2.4.2. Cálculo de Capacidad	40
2.5. PRUEBAS DEL SIMULADOR	45
CAPÍTULO 3: CASOS DE ESTUDIO	47
3.1. INTRODUCCIÓN.....	47
3.2. ESCENARIO 1	48
3.2.1. Análisis de la SINR del Sistema y Número de Usuarios Atendidos.....	49
3.2.2. Análisis del <i>Throughput</i> del Sistema	52
3.3. ESCENARIO 2	57
3.3.1. Análisis de la SINR del Sistema y Número de Usuarios Atendidos.....	58
3.3.2. Análisis del <i>Throughput</i> del Sistema.	60
3.4. ESCENARIO 3	62
3.4.1. Sistema con Cuatro Celdas.....	63
3.4.2. Sistema con Siete Celdas	65
3.4.2. Sistema con Nueve Celdas	67
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	70
4.1 CONCLUSIONES.....	70
4.2 TRABAJOS FUTUROS	72
BIBLIOGRAFÍA	74



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Evolución de Tecnologías Móviles Celulares. Por los Autores.....	4
Figura 1. 2. Arquitectura LTE. Adaptada de [7].	5
Figura 1. 3. Dominios del Equipo de Usuario. Tomada de: [7].	5
Figura 1. 4. Arquitectura E-UTRAN. Adaptada de: [10].	6
Figura 1. 5. Arquitectura de la Red Troncal LTE-EPC. Tomada de: [12].	8
Figura 1. 6. Bloque de Recursos Físicos. Tomada de: [13].	10
Figura 1. 7. Técnicas de Diversidad Espacial. Por los autores.....	12
Figura 1. 8. Espectro de una Señal OFDM con 4 Sub-portadoras. Adaptada de: [13]	13
Figura 1. 9. Eficiencia espectral OFDM. Tomada de [12].	13
Figura 1. 10. Transmisión OFDM Basada en la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT). Por los autores.	14
Figura 1. 11. Recepción OFDM basada en la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Por los autores.	15
Figura 1. 12. Desvanecimiento del Canal con OFDM. Tomada de: [1].	15
Figura 1. 13. OFDMA con 4 sub-portadoras. Adaptada de [15].	16
Figura 1. 14. Asignación de recursos OFDM y OFDMA. Tomada de: [17].	17
Figura 1. 15. ICIC para LTE en los Release del 3GPP. Tomada de [13]	18
Figura 1. 16. Reúso de Frecuencia Universal. Por los Autores.	19
Figura 1. 17. Reúso de Frecuencia Universal. Por los Autores.	20
Figura 1. 18. Reúso de Frecuencia Suave. Por los Autores.....	21
Figura 1. 19. Distribución de Frecuencias SFR. Por los Autores.....	22
Figura 1. 20. Reúso de Frecuencia Parcial. Por los autores.	23
Figura 1. 21. Distribución de Frecuencia PFR. Por los autores.	24
Figura 1. 22. Reúso de Frecuencia Fraccional 3. Por los autores.	25
Figura 1. 23. Distribución de Frecuencias FFR 3. Por los autores.	25
Figura 1. 24. Reúso de Frecuencia Estricto. Por los Autores.	26
Figura 1. 25. Distribución de Frecuencias StFR. Por los Autores.....	26
Figura 1. 26. Reúso de Frecuencia Fraccional 1.5. Por los autores	27
Figura 1. 27. Distribución de Frecuencias FFR 1.5. Por los autores.	28
Figura 1. 28. Reúso de Frecuencia Incremental. Por los autores.....	28
Figura 1. 29. Distribución de Frecuencias IFR. Por los autores.	29
Figura 1. 30. Reúso de Frecuencia Cooperativo. Por los autores.	30
Figura 1. 31. Distribución de Frecuencias CFR. Por los autores.	30
Figura 2. 1. Metodología RUP. Tomada de: [33]	31
Figura 2. 2. Entradas y Salidas del Simulador. Por los Autores.	35
Figura 2. 3. Modelo del Sistema. Por los Autores.	36
Figura 2. 4. Diagrama de Flujo General para el Simulador. Por los autores.	37
Figura 2. 5. Diagrama de Flujo para SFR. Por los autores.....	40
Figura 2. 6. Diagrama de Flujo para FFR 1.5. Por los autores.....	40
Figura 2. 7. Numeración de las Celdas del Sistema. Por los autores.....	41
Figura 2. 8. Frecuencias para las 4 celdas con SFR. Por los autores.....	43
Figura 2. 9. Frecuencias para las 4 celdas con FFR1.5. Por los autores.	44



Figura 3. 1. Throughput UFR Caso 1 - Escenario 1.	53
Figura 3. 2. Throughput SFR Caso 1 - Escenario 1.	53
Figura 3. 3. Throughput FFR1.5 - Escenario1.	54
Figura 3. 4. CDF de SINR Total del Sistema.	49
Figura 3. 5. Variaciones del Porcentaje del Radio del Borde de la Celda para el Escenario 2.	58
Figura 3. 6. Distribución Celdas del Sistema.	63
Figura 3. 7. Throughput con UFR-Sistema de 4 Celdas.	64
Figura 3. 8. Throughput con SFR- Sistema de 4 celdas.	64
Figura 3. 9. Throughput con FFR1.5- Sistema de 4 celdas.	65
Figura 3. 10. Throughput con UFR- Sistema de 7 Celdas.	66
Figura 3. 11. Throughput con SFR- Sistema de 7 Celdas.	66
Figura 3. 12. Throughput con FFR1.5- Sistema de 7 Celdas.	67
Figura 3. 13. Throughput con UFR- Sistema de 9 Celdas.	68
Figura 3. 14. Throughput con SFR- Sistema de 9 Celdas.	68
Figura 3. 15. Throughput con FFR1.5- Sistema de 9 Celdas.	69



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. 1. Bloque de Recursos Físicos vs Ancho de Banda.	11
Tabla 2. 1. Parámetros Variables del Simulador.	46
Tabla 3. 1. Parámetros Fijos Capacidad Escenario 1.	48
Tabla 3. 2. Resultados de Throughput para el Escenario 1.	55
Tabla 3. 3. Resultados de SINR del Escenario 1.	50
Tabla 3. 4. Parámetros Fijos Escenario 2.	57
Tabla 3. 5. Variaciones del Escenario 2.	57
Tabla 3. 6. Resultados de Throughput Escenario 2.	60
Tabla 3. 7. Resultados SINR Escenario 2.	59
Tabla 3. 8. Configuración Escenario 3.	62



LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> , Proyecto Asociación de Tercera Generación.
ASFR	<i>Adaptative Soft Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Suave Adaptativo.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulativa.
CoMP	<i>Coordinated Multipoint</i> , Coordinación Multipunto.
CP	<i>Cyclic Prefix</i> , Prefijo Cíclico.
CS	<i>Circuit Switching</i> , conmutación de circuitos.
DL	<i>Down Link</i> , Enlace Descendente.
eNodeB	<i>Evolved Node B</i> , Nodo B Evolucionado.
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Paquetes Evolucionado.
EPS	<i>Evolved Packet System</i> , Sistema de Paquetes Evolucionado.
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> , Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada.
FFR	<i>Fractional Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Fraccional.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
HFR	<i>Hard Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Duro.
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i> , Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace de Bajada.
HSPA+	<i>High Speed Packet Access Plus</i> , Acceso por Paquetes de Alta Velocidad Evolucionado.
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i> , Acceso por Paquetes de Alta Velocidad.
HSS	<i>Home Subscriber Server</i> , Base de Datos Principal del Sistema.
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i> , Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace de Subida.
ICIC	<i>Inter Cell Interference Coordination</i> , Coordinación de Interferencia Inter-Celda.
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida Inversa de Fourier.
IFR	<i>Incremental Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Incremental.
IP	<i>Internet Protocol</i> , protocolo de internet.
ISI	<i>InterSymbol Interference</i> , Interferencia InterSimbolica.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Término.
ME	<i>Mobile Equipment</i> , Equipo Móvil.
MIMO	<i>Multi Input Multi Output</i> , Múltiples Entradas Múltiples Salidas.
MISO	<i>Multiple Input-Single Output</i> , Múltiples Entradas-Una Salida.
MME	<i>Management Mobility Entity</i> , Entidad de Gestión de Movilidad.
MR	<i>Maximum Rate</i> , Máxima Velocidad.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.



OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i> , Relación de Potencia Pico a Potencia Promedio Pico de Relación de Potencia Media.
PDF	<i>Probability Density Function</i> , Función de Densidad de Probabilidad.
PF	<i>Proportional Fair</i> , Proporcional y Justa.
PFR	<i>Partial Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Parcial.
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i> , Puerta de Enlace de la Red de Paquetes de Datos.
PRB	<i>physical Resource Block</i> , Bloque de Recursos Físicos.
PS	<i>Packet Switching</i> , Conmutación de Paquetes.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RR	<i>Round Robin</i> .
SAE	<i>Evolved Packet Core</i> , Evolución de arquitectura del sistema.
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Divison Multiple Access</i> , Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única.
SFR	<i>Soft Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Suave.
S-GW	<i>Serving Gateway</i> , Puerta de Enlace del Servicio.
SISO	<i>Single Input-Single Output</i> , Una entrada-Una Salida.
SIM	<i>Subscriber Identification Module</i> . Módulo de Identificación de Suscripción.
SIMO	<i>Single Input-Multiple Output</i> , Una entrada Múltiples Salidas.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido más Interferencia.
StFR	<i>Strict Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Estricto.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UFR	<i>Universal Frequency Reuse</i> , Reúso de Frecuencia Universal.
UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card</i> , Tarjeta Universal de Circuito Integrado.
UL	<i>Up Link</i> , Enlace Ascendente.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.



CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El camino recorrido por las telecomunicaciones ha sido muy largo, desde los primeros experimentos de transmisión de ondas electromagnéticas realizados por Guglielmo Marconi en 1890 hasta la cuarta generación de redes de telefonía móvil celular, presente en la actualidad. A lo largo de esta evolución las telecomunicaciones se han caracterizado por su constante innovación e inclusión en la sociedad.

Los sistemas celulares nacen en Estados Unidos para ser empleados por los organismos de seguridad pública como la policía o los bomberos y eran instalados en las bodegas de los automóviles debido a su tamaño. Estos equipos evolucionaron y se volvieron más portables cuando Martin Cooper, un empleado de la empresa Motorola creó el primer teléfono celular en 1973. Aunque no fue en Estados Unidos donde comenzó la innovación con este nuevo invento, fue en Europa donde se comenzó a trabajar con los primeros estándares del sistema global para las comunicaciones móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*) [1].

La primera generación de la tecnología móvil celular era completamente analógica y solo permitía la transmisión de la voz, a continuación la segunda generación logró enviar cortos mensajes de texto sin modificar la infraestructura, Su evolución 2.5G implementó el concepto de transmisión de paquetes pero con una baja velocidad de transmisión, luego en la tercera generación aumentó el ancho de banda, finalmente en 3.5G se dejó a la voz la transmisión analógica y los datos fueron transmitidos digitalmente con lo que se soportó el tráfico multimedia.

El crecimiento tecnológico de los sistemas móviles celulares refleja la existencia de un mercado altamente dinámico que requiere de una alta capacidad de adaptación e innovación para anticipar y satisfacer las necesidades de los usuarios, además de hacer frente a los múltiples competidores [2]. En el proceso evolutivo de las telecomunicaciones móviles, los datos se han convertido en un modelo de negocio y tienen un valor agregado. Las tendencias muestran un aumento en el número de dispositivos conectados y por tanto mayor información transmitida en la red. Las nuevas redes deben estar preparadas para soportar mayor capacidad y brindar altas velocidades, con el fin de prestar servicios de alta calidad. El problema es que el espectro electromagnético es un recurso físico limitado, las alternativas restantes para suplir esta limitación son reducir el tamaño de la celda y hacer un uso eficiente de los recursos disponibles.



1.2. REQUERIMIENTOS DE LTE

La llegada de una nueva tecnología en las comunicaciones móviles pretende satisfacer las demandas de los usuarios que cada día se tornan más exigentes en cuanto a capacidad y velocidad de transmisión de datos. Con la cuarta generación de la telefonía móvil celular se busca además, reducir costos en la infraestructura de la red y migrar el sistema al modelo de negocio de los datos.

En general la tecnología móvil celular Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) tiene los siguientes requerimientos [3]:

- Reducir el costo por bit.
- Mejorar el servicio prestado.
- Hacer un uso flexible de las bandas de frecuencias nuevas y existentes.
- Simplificar la arquitectura de la red con interfaces abiertas.
- Hacer que los terminales tengan un uso razonable de potencia.
- Aumentar las tasas de transmisión para el Enlace de Bajada (DL, *DownLink*) y el Enlace de Subida (UL, *UpLink*), 100Mbps y 50Mbps respectivamente.
- Manejar un ancho de banda escalable de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz para el DL y el UL.
- Mejorar la eficiencia espectral sobre el *Release 6* de 3 a 4 veces para el DL y de 2 a 3 veces en el UL.
- Lograr una latencia menor a 5ms para pequeños paquetes del Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*).
- Optimizar el desempeño para movilidad desde 0 a 15Km/h, soportar alto desempeño de 15 a 120Km/h, tener un desempeño funcional de 120 a 350Km/h y soportar movilidad de 350 a 500Km/h.
- Coexistir con estándares anteriores.
- Implementar toda la red en tráfico IP [4].



- Utilizar diversidad: Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), *Beam forming*¹.
- Implementar acceso múltiple: Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para DL y Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para UL.

1.3. GENERALIDADES LTE

LTE fue impulsada a partir del Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*), que decide lanzar la evolución al estándar dominante de ese entonces que cubría más del 85% de la comunidad móvil [5], por lo que se requería brindar una nueva experiencia de velocidad y movilidad para el usuario.

La evolución de las redes móviles se ha dado desde el lanzamiento del Sistema Universal de Telecomunicaciones Móvil (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) que fue presentado en el *Release 99 (R99)* del 3GPP, además es la primera versión de las tecnologías de tercera generación, la evolución de UMTS conocida como Acceso por Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High Speed Packet Access*) representa las mejoras en la interfaz radio y combina las tecnologías: Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Descendente (HSDPA, *High Speed Downlink Packet Access*) y Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Ascendente (HSUPA, *High Speed Downlink Packet Access*) especificadas respectivamente en el *Release 5 (R5)* y *Release 6 (R6)* del 3GPP. A fin de mejorar el desempeño de las redes radio basadas en HSPA en términos de eficiencia espectral, velocidad de datos máxima y latencia, el *Release 7 (R7)* describe HSPA evolucionado (HSPA+, *High Speed Packet Access Plus*). En la Figura 1. 1, se puede observar la evolución de estas tecnologías para redes móviles.

¹ Beam Forming: O filtrado espacial es una técnica de procesamiento de señales utilizado en redes de sensores para la transmisión o recepción de una señal direccional.

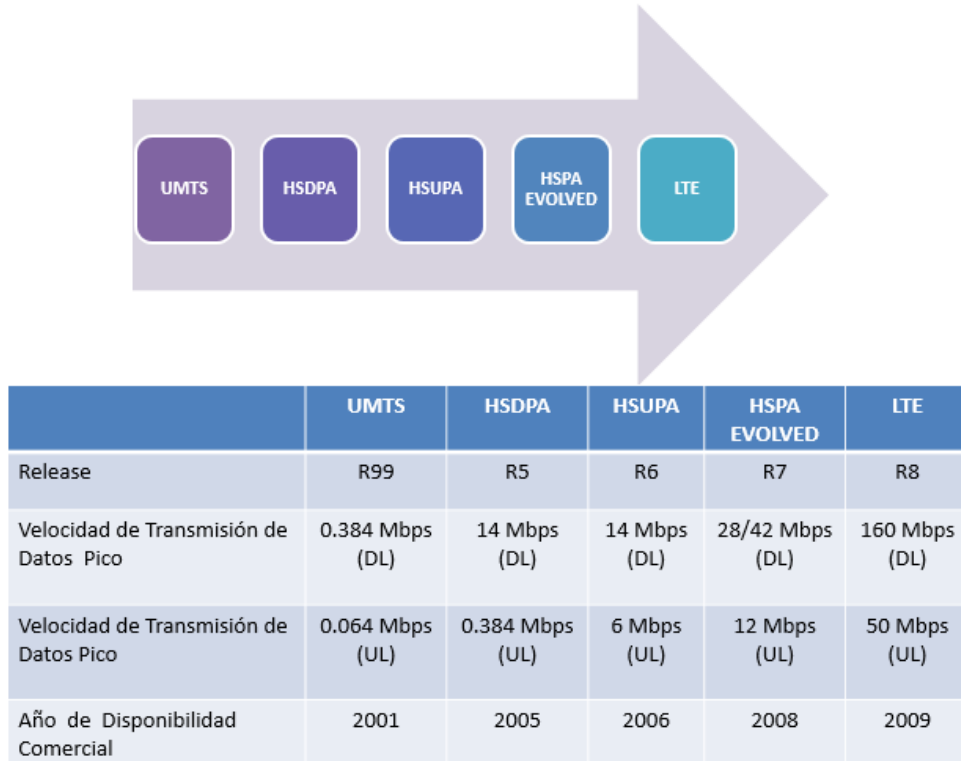


Figura 1. 1. Evolución de Tecnologías Móviles Celulares. Por los Autores.

1.4. ARQUITECTURA DE LTE

Uno de los principales cambios de la arquitectura LTE es el manejo de la información, en tecnologías anteriores se usaba la Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*), en LTE se maneja únicamente la Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switching*), esto se debe al auge de servicios IP en la actualidad [6].

Se tienen dos elementos principales dentro de la arquitectura en mención, por una parte, la nueva Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) definida por el 3GPP y la evolución en la arquitectura del núcleo de red, denominada Evolución de Arquitectura del Sistema (SAE, *Evolved Packet Core*), la cual incluye el nuevo Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*), lo que permite tener características tales como una alta velocidad de transmisión y baja latencia de paquetes. El conjunto de dichos elementos constituyen la red LTE denominada Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [6].

La arquitectura del sistema EPS tiene tres partes, el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*), la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC, como se observa en la Figura 1. 2.

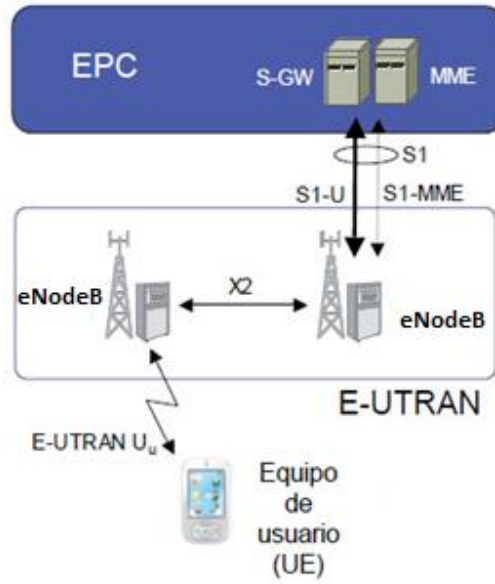


Figura 1. 2. Arquitectura LTE. Adaptada de [7].

1.4.1. Equipo de Usuario

El UE proporciona la conexión a la red LTE, permite acceder a los servicios mediante la interfaz radio, contiene dos elementos principales, la Tarjeta Universal de Circuito Integrado (UICC, *Universal Integrated Circuit Card*) o Módulo de Suscripción (SIM, *Subscriber Identification Module*) y el Equipo Móvil (ME, *Mobile Equipment*) [7].

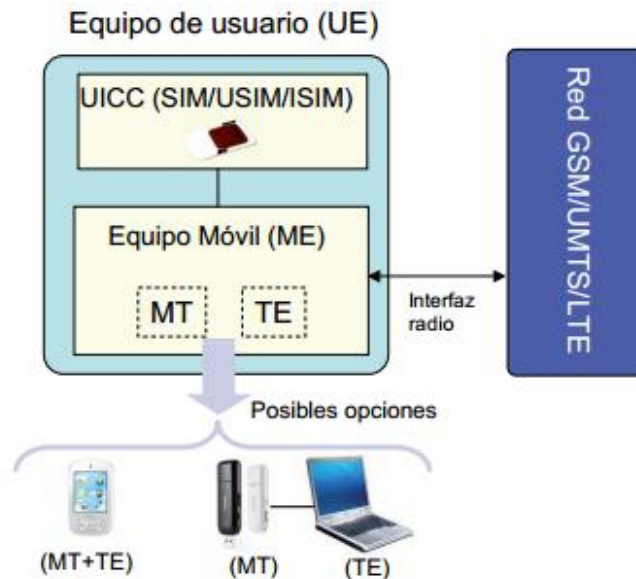


Figura 1. 3. Dominios del Equipo de Usuario. Tomada de: [7].

1.4.2. Red de Acceso E-UTRAN

La única entidad de red para LTE es la estación base denominada Nodo B Evolucionado, en esta estación se tienen todas las funcionalidades de la red de acceso. Las tecnologías anteriores como GSM y UMTS necesitaban entidades controladoras para las estaciones base [8].

El eNodeB actúa como un puente de capa 2 entre los UE y EP, existen tres interfaces para la comunicación con los usuarios, con la red troncal y con los eNodeB, estos se mencionan a continuación:

- La interfaz Uu es la encargada de comunicar al usuario con la estación base por medio del canal radio.
- La interfaz S1 permite la comunicación entre la red troncal y los eNodeB.
- La interfaz X2 se utiliza para la conexión de los eNodeB entre sí.

La arquitectura de red de acceso E-UTRAN se ilustra en la Figura 1. 4.

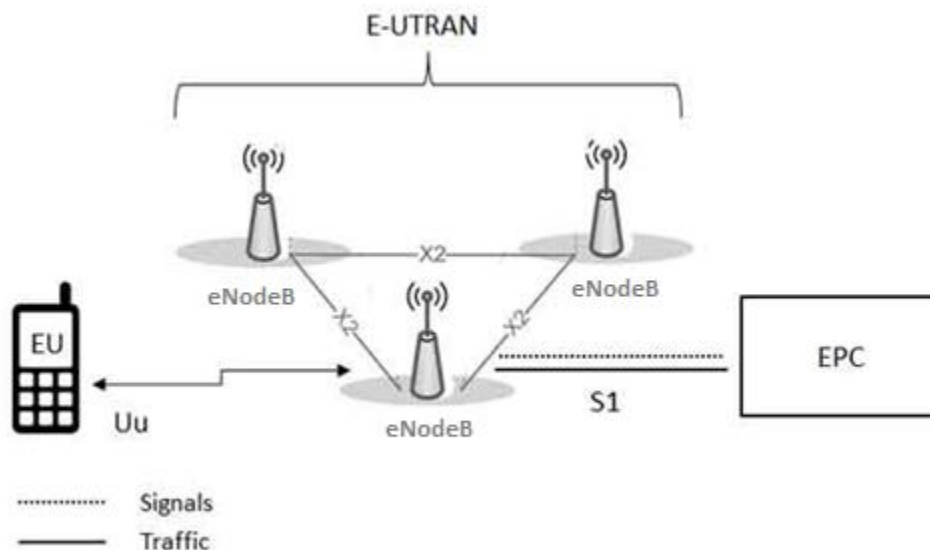


Figura 1. 4. Arquitectura E-UTRAN. Adaptada de: [10].



1.4.2.1. eNodeB

El eNodeB integra todas las funciones de la red de acceso, por lo que en este terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio. Gracias a estos protocolos el eNodeB puede encaminar los paquetes hacia y desde los UE, junto con los mensajes de señalización. El servicio portador de radio es el encargado de la transferencia de paquetes entre el eNodeB y los UE.

Mantener actualizada la información de los UE que tiene asociados es otra de las funciones que debe realizar el eNodeB, la información a actualizar corresponde a datos como: el estado del equipo, los servicios portadores activos, la información de seguridad y la capacidad del terminal.

La función clave del eNodeB es la gestión de recursos radio, para esto realiza procedimientos como: control de movilidad, asignación dinámica de recursos radio para el DL y el UL, control de interferencias entre estaciones base, realización de medidas desde los UE que se utilizan en la gestión de recursos.

El eNodeB realiza una selección dinámica de la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Management Mobility Entity*) cuando un terminal se registra en la red LTE. Esta función otorga flexibilidad en la operatividad de la red, el eNodeB puede estar conectado simultáneamente con múltiples MME de la red troncal [9].

1.4.3. Núcleo de Red EPC

Esta red fue desarrollada, para soportar tráfico totalmente IP y dicho núcleo de red está formado por entidades que realizan funciones tales como: la conmutación de paquetes, conexión con otras redes, tarificación y provisión de servicios a usuarios de redes de acceso tanto 3GPP como a otras redes.

El núcleo de red está formado por tres entidades de red a saber: MME, la Pasarela de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*), y la Pasarela de Red de Paquetes de Datos (P-GW, *Packet Data Network Gateway*), que en unión con la Base de Datos Principal del Sistema (HSS, *Home Subscriber Server*) conforman los elementos esenciales para la conectividad IP entre los equipos de usuario de la red LTE, los cuales están conectados a través de la red de acceso E-UTRAN y redes externas [8].

Los componentes del núcleo de red se observan en la Figura 1. 5.

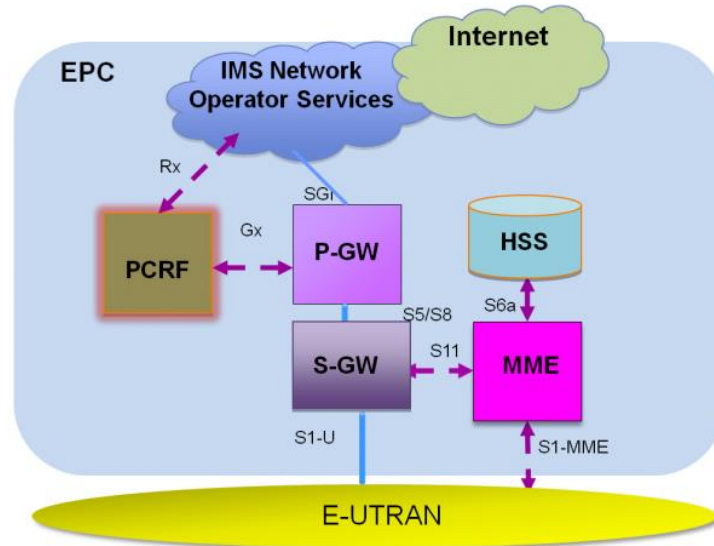


Figura 1. 5. Arquitectura de la Red Troncal LTE-EPC. Tomada de: [12].

1.4.3.1. Entidad de Gestión de Movilidad

La MME es el elemento principal de control del EPC y algunas de sus funciones son [8]:

- Autenticación y Seguridad: El MME es responsable de autenticar al UE mediante la interacción con el HSS.
- Gestión de Movilidad: La MME mantiene actualizada la posición de todos los UE en su área de servicio.
- Manejo del Perfil de Suscripción y el Servicio de Conectividad: Este perfil determina la clase de tráfico que se le asigna al UE.

1.4.3.2. Pasarela de Servicio

La S-GW es la encargada de [8]:

- Realizar la gestión y conmutación de la información relacionada con el plano de usuario.



- Efectuar traspasos por indicación de la MME, estos se realizan cambiando el túnel de un eNodeB a otro.
- Tarificar, mediante el monitoreo de datos de la red.
- Hacer interceptaciones legales.
- Liberar, modificar o establecer una portadora, por solicitud de la MME o la P-GW.
- Retransmitir datos entre el eNodeB y la P-GW.

1.4.3.3. Pasarela de Red de Paquetes de Datos

La P-GW realiza funciones como [8]:

- Usar un enrutador de frontera entre el EPS y las redes de paquetes de datos externas.
- Asignar dirección IP al UE.
- Filtrar.

1.4.3.4. Servidor de Suscripción Local

El HSS es el servidor de bases de datos y se encarga de [8]:

- Tener una copia maestra del perfil de usuario.
- Almacenar la localización del usuario.
- Guardar claves de cifrado.
- Interactuar con la MME.

1.5. CARACTERÍSTICAS DE LTE

LTE brinda características y mejoras importantes respecto a las tecnologías antecesoras, las más relevantes son: su alta eficiencia espectral debida al tipo de modulación que emplea, reducción en la latencia, mayor velocidad de transmisión de datos, ancho de banda adaptativo, mayor capacidad y cobertura en el sistema.



A continuación se explican algunos de los cambios más notables que permiten satisfacer los requerimientos.

1.5.1. Bloque de Recursos Físicos

Se conoce como Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*) a la mínima unidad de recursos que puede ser asignada por un eNodeB a un equipo de usuario. Como se observa en la Figura 1. 6, cada bloque ocupa 180 KHz de ancho de banda, lo que equivale a 12 sub-portadoras equiespaciadas de 15 KHz, donde se transmiten 7 símbolos con Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) en un slot de 0.5 ms, por lo que al tener 7 símbolos con 12 sub-portadoras asociadas a cada uno de ellos, se tiene un total de 84 recursos que pueden transportar 2, 4 o 6 bits dependiendo de la modulación asignada a cada usuario [2].

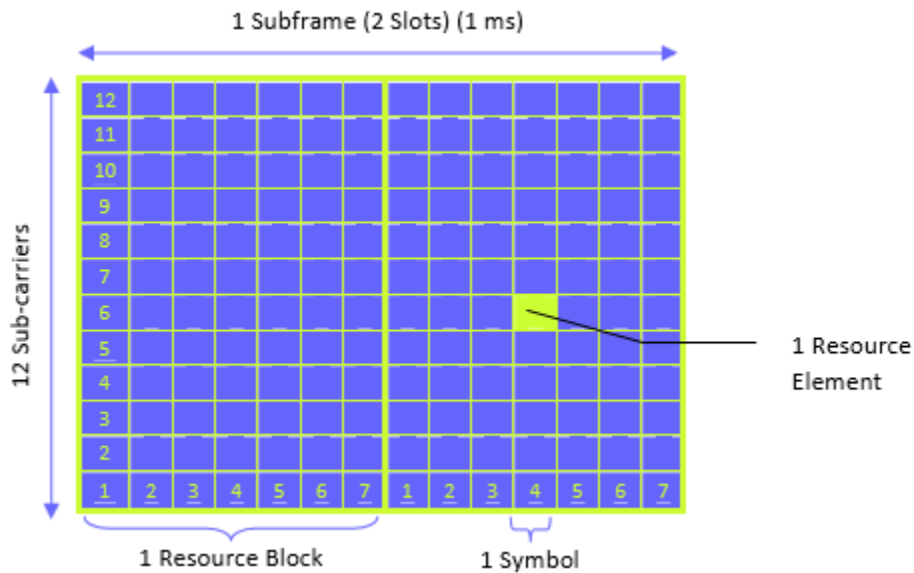


Figura 1. 6. Bloque de Recursos Físicos. Tomada de: [13].

1.5.2. Estrategia de Planificación de Paquetes

La estrategia de planificación de paquetes establece el número de usuarios que pueden transmitir en una celda determinada y en qué bloques de recursos físicos de una subtrama, el eNodeB se encarga de la planificación tanto en el DL como en el UL. Aunque existen diferentes estrategias de planificación, tres de las más empleadas son: Máxima Velocidad (MR, *Maximum Rate*), Proporcional y Justa



(PF, *Proportional Fair*) y *Round Robin* (RR). PF y MR determinan y asignan los recursos radio de acuerdo al estado del canal, mientras que RR asigna equivalentemente los recursos disponibles del eNodeB a los usuarios que tiene bajo su demanda, sin importar el estado del canal radio.

1.5.3. Ancho de Banda Variable

LTE permite operar en diferentes anchos de banda, las especificaciones de esta tecnología definen valores de: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15, MHz o 20 MHz [10].

La Tabla 1. 1 muestra la relación entre el ancho de banda y el número de PRB que el planificador del eNodeB puede distribuir entre los usuarios servidos por él.

Tabla 1. 1. Bloque de Recursos Físicos vs Ancho de Banda.

Ancho de banda del canal (MHz)	Número de PRB
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

1.5.4. Diversidad Espacial

LTE utiliza estrategias de diversidad espacial al implementar N antenas de transmisión y/o recepción, el tipo de diversidad espacial se puede precisar de acuerdo al número de antenas que se tienen entre el transmisor y el receptor. La Figura 1. 7 muestra las diferentes configuraciones de diversidad espacial definidas para LTE [11].

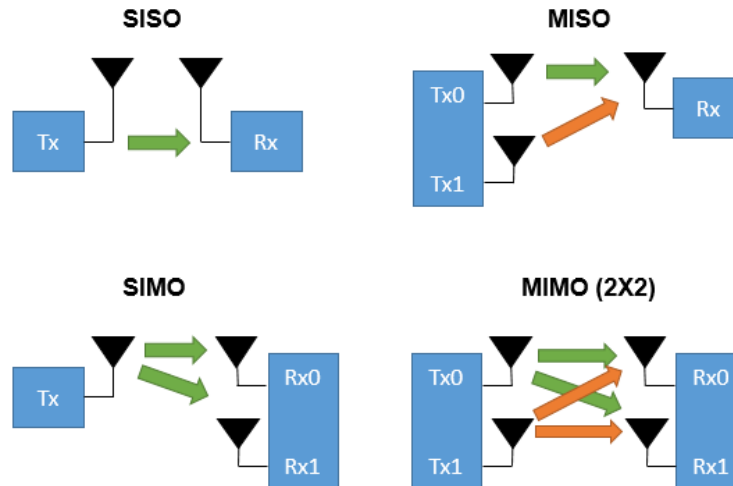


Figura 1. 7. Técnicas de Diversidad Espacial. Por los autores.

Los sistemas que cuentan con una antena tanto en transmisión como en recepción se les denomina Sistemas de Una Entrada y Una Salida (SISO, *Single Input-Single Output*); para sistemas con una antena en transmisión y múltiples antenas en recepción, se denominan Sistemas de Una Entrada y Múltiples Salidas (SIMO, *Single Input-Multiple Output*); cuando se tienen múltiples antenas en transmisión y una única antena en recepción, se les denomina Sistemas de Múltiples Entradas y Una Salida (MISO, *Multiple Input-Single Output*) y cuando se tiene más de una antena tanto en transmisión como en recepción, se denomina MIMO siendo esta última configuración la que obtiene un mayor desempeño en cuanto a la capacidad del sistema.

1.6. OFDM

OFDM es un mecanismo de transmisión multiportadora que multiplexa un conjunto de símbolos sobre un conjunto de sub-portadoras ortogonales entre sí, como se muestra en la Figura 1. 8.

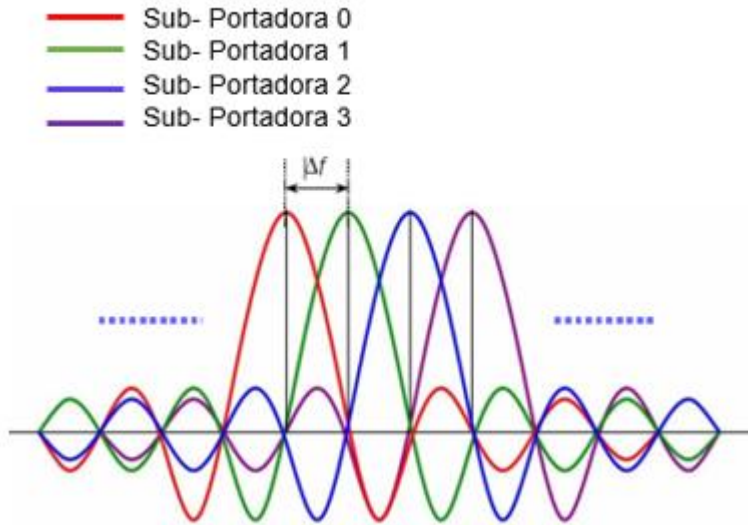


Figura 1. 8. Espectro de una Señal OFDM con 4 Sub-portadoras. Adaptada de: [13]

La característica de ortogonalidad, implica que la correlación entre las sub-portadoras sea cero, lo que permite realizar una transmisión simultánea de los símbolos en un rango estrecho de frecuencias y que el espectro de estas se pueda traslapar sin que se produzcan interferencias en recepción [2], gracias a esto no se utilizan bandas de guarda y aumenta la eficiencia espectral [10]. Esto se muestra en la Figura 1. 9.

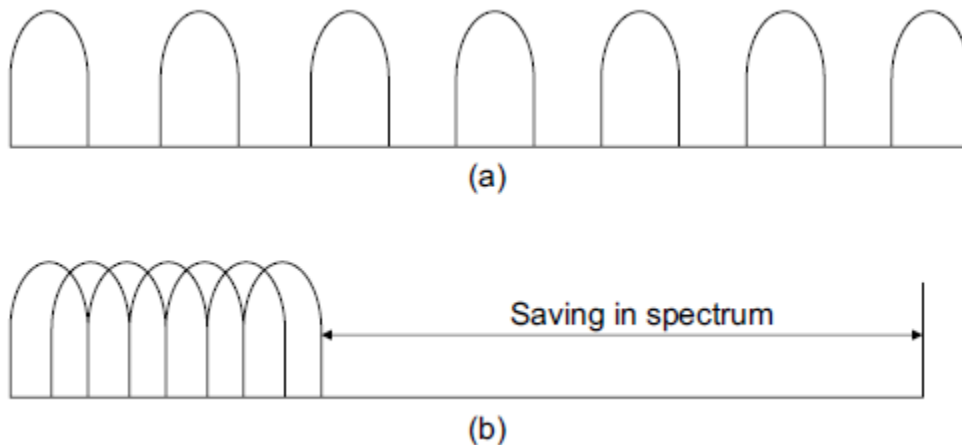


Figura 1. 9. Eficiencia espectral OFDM. Tomada de [12].

En la Figura 1. 10 se observa el proceso de transmisión de OFDM. OFDM usa k sub-portadoras, es por esto que necesita de k símbolos complejos en tiempo discreto para representar un símbolo OFDM, los bits de información se mapean según la modulación que utiliza cada una de las sub-portadoras, los símbolos resultantes del mapeo se convierten de seriales a bloques de datos paralelos y se

aplica la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*), este proceso proporciona muestras temporales de la señal con características de ortogonalidad y se agrega el Prefijo Cíclico (CP, *Cyclic Prefix*). El CP se utiliza para evitar la Interferencia Inter-Simbólica (ISI, *InterSymbol Interference*), se genera duplicando la última muestra de la IFFT y se ubica al comienzo del vector de muestras [12]. Dichas muestras pasan por un conversor digital/analógico (D/A) para así generar la señal analógica que se desea transmitir.

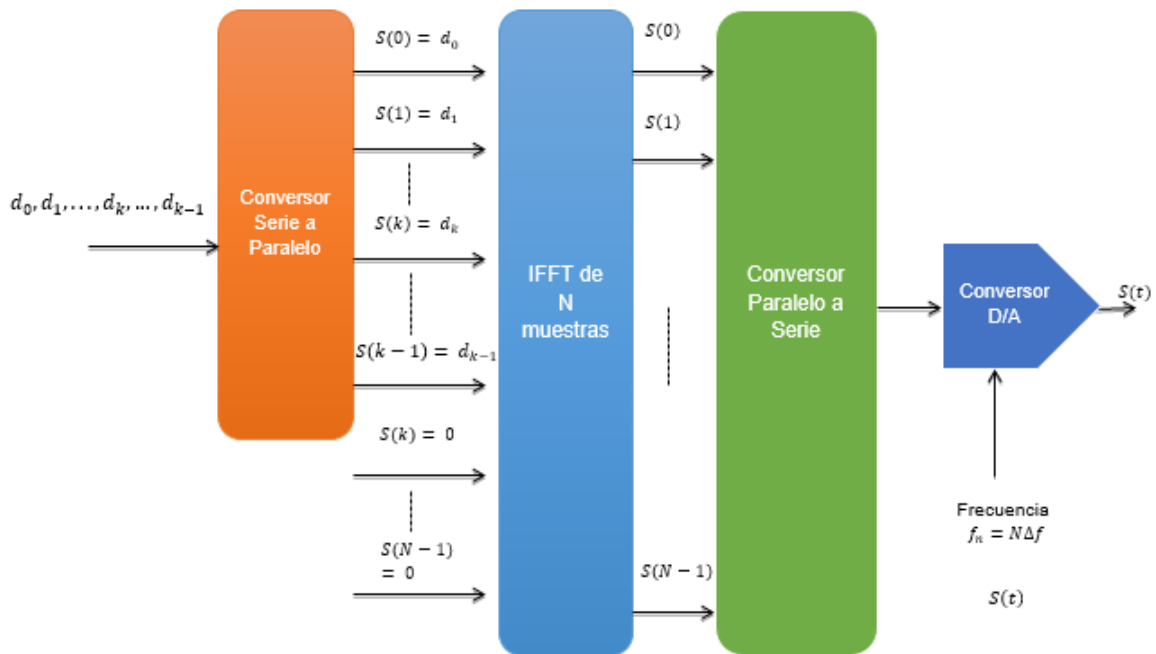


Figura 1. 10. Transmisión OFDM Basada en la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT). Por los autores.

El proceso de recepción es inverso al de transmisión como se muestra en la Figura 1. 11, al convertir la señal en digital y pasarla de serie a paralelo se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*). Las primeras k muestras constituyen símbolos que se deben recuperar, mientras que las restantes son descartadas debido a que corresponden a los $N-K$ ceros, que son añadidos en el transmisor para realizar el proceso de IFFT.

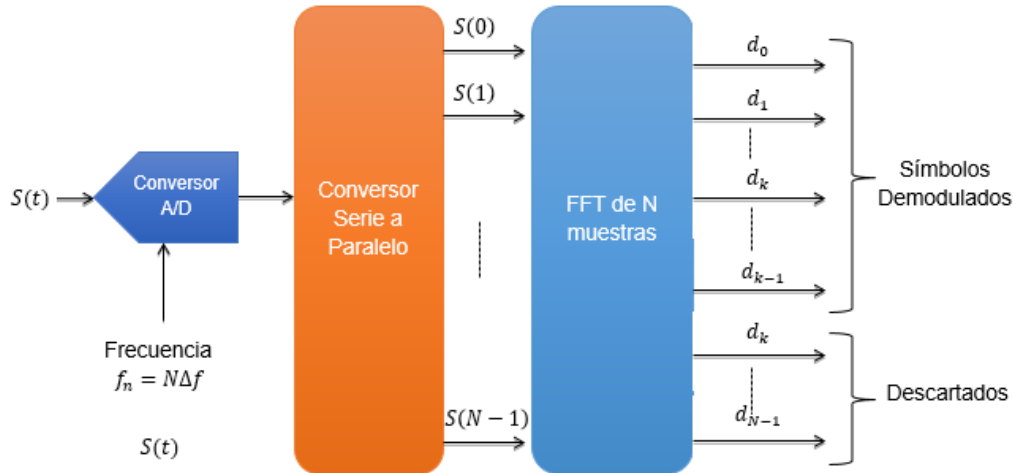


Figura 1. 11. Recepción OFDM basada en la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Por los autores.

OFDM garantiza que el multirrayecto no tenga un efecto crítico sobre la señal, esto se logra aumentando la duración del tiempo de símbolo, asegurando que sea mayor que la dispersión del retardo del canal. Para no afectar la velocidad de transmisión, en lugar de transmitir un flujo en serie de alta velocidad, se transmiten múltiples flujos en paralelo de menor velocidad.

En presencia de desvanecimiento selectivo en frecuencia varias sub-portadoras de OFDM se pueden perder como se muestra en la Figura 1. 12, en la práctica se utiliza codificación, especialmente en comunicaciones móviles, esto implica que los bits de información son agrupados en símbolos y mapeados sobre diferentes sub-portadoras OFDM distribuidas sobre el ancho de banda disponible. Por lo tanto la información perdida a causa de este desvanecimiento cuenta con un respaldo en sub-portadoras con diferentes frecuencias.

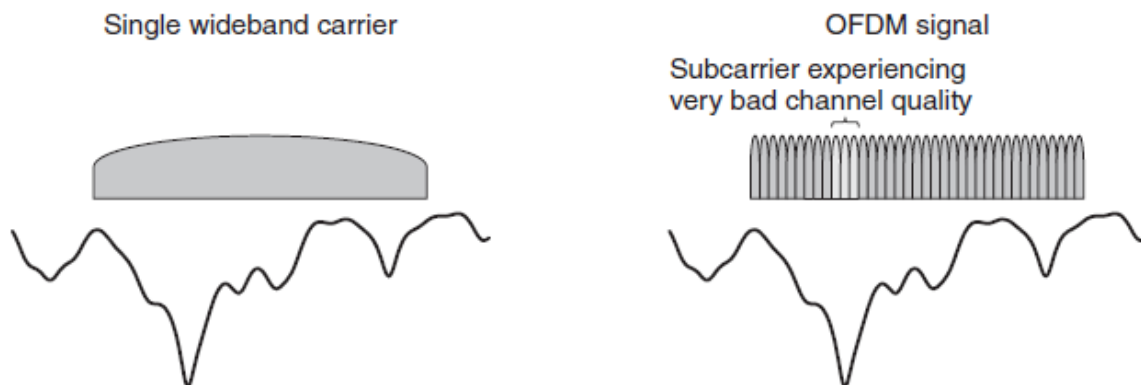


Figura 1. 12. Desvanecimiento del Canal con OFDM. Tomada de: [1].

Los problemas más notables de OFDM consisten en que requiere una alta sincronización para mantener la ortogonalidad de las sub-portadoras y que genera una alta Relación de Potencia Pico a Potencia Promedio Pico de Relación de Potencia Media (PAPR, *Peak-to-Average Power Ratio*), esto se debe a que cada símbolo es mapeado en una sub-portadora diferente y en la transmisión se envía la sumatoria de estas sub-portadoras, este es el motivo por el que en el UL no se utiliza OFDMA.

1.7. OFDMA

OFDMA es una técnica de acceso múltiple utilizada en el DL de LTE, en la cual un conjunto de usuarios comparte el espectro, esto se logra dividiendo el canal en sub-portadoras de 15KHz encargadas de transportar símbolos OFDMA, como se muestra en Figura 1. 13. Estas son asignadas por grupos según las necesidades de los usuarios

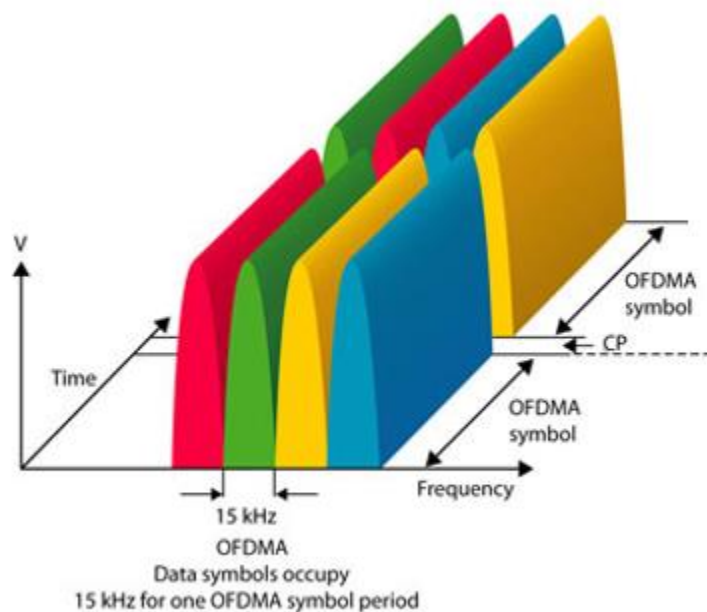


Figura 1. 13. OFDMA con 4 sub-portadoras. Adaptada de [15].

OFDMA permite hacer una asignación dinámica de las sub-portadoras como se muestra en la Figura 1. 14, el número de sub-portadoras otorgadas a los usuarios depende de las demandas de velocidad y de las condiciones del canal, además cambia en cortos periodos de tiempo. El proceso de asignación cambiante y adaptativo, se traduce en una mejor utilización de los recursos disponibles y permite alcanzar mayores velocidades. Las sub-portadoras asignadas no son necesariamente contiguas por lo que puede existir una separación tal que las condiciones del canal sean independientes para cada una. Cada UE conectado a

la red hace uso de varios servicios y tiene requerimientos diferentes de velocidad. OFDMA maneja eficientemente las demandas de los usuarios, asignándole a cada uno diferente número de sub-portadoras.

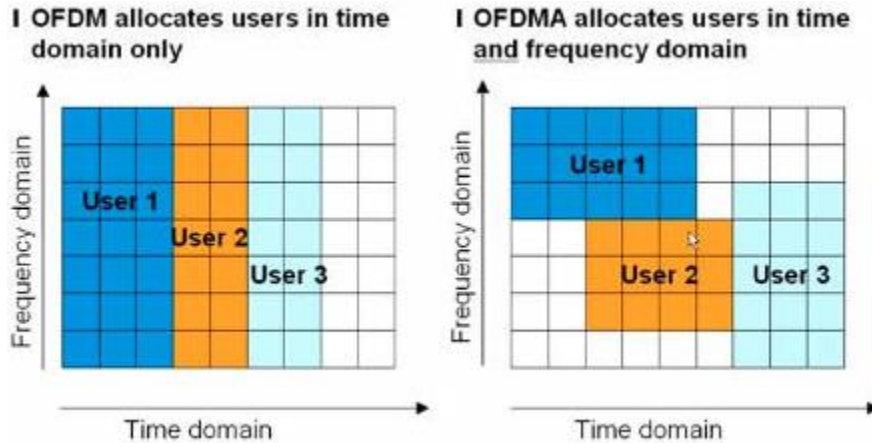


Figura 1. 14. Asignación de recursos OFDM y OFDMA. Tomada de: [17].

1.8. INTERFERENCIA INTER-CELDA

LTE emplea reúso de frecuencia igual a uno, es decir que en cada celda se utiliza la totalidad de los recursos disponibles, causando interferencia inter-celda ya que los UE ubicados en los bordes de la celda además de percibir la señal del eNodeB al que se encuentran conectados, perciben la señal de los eNodeB de las celdas vecinas. La interferencia inter.-celda impide que los UE del borde alcancen altas velocidades y por consiguiente reduce la velocidad total del sistema, por lo que es uno de los parámetros más importantes en el desempeño de una red. LTE busca que todos los UE de la red tengan alcancen altas velocidades de transmisión de datos, por lo que es necesario implementar esquemas de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC, *Inter Cell Interference Coordination*) [13].

En la Figura 1. 15 se muestra la consideración de las técnicas ICIC en los estándares del 3GPP para LTE. En el *Release 8* se enuncia que se han realizado estudios sobre estas técnicas pero no se describen dichos estudios.

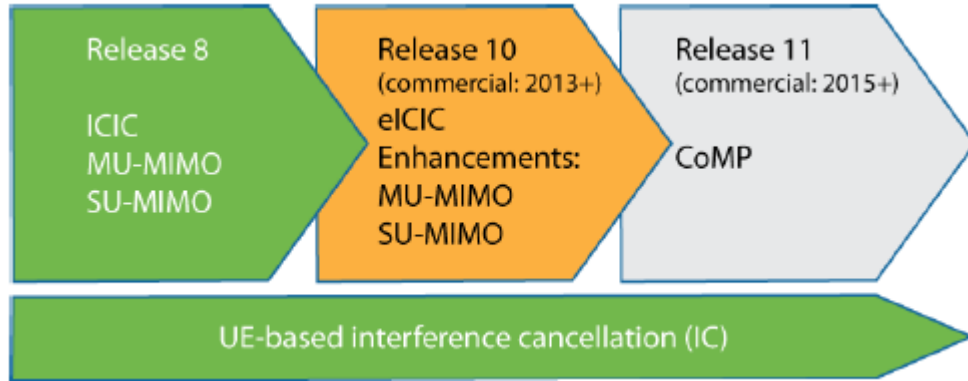


Figura 1. 15. ICIC para LTE en los Release del 3GPP. Tomada de [13]

Para calcular la interferencia inter-celda es necesario conocer la potencia de transmisión y la ganancia de los eNodeB vecinos, con estos datos se realiza un balance del enlace con respecto al UE objetivo, este proceso se realiza para cada señal interferente. La potencia interferente que percibe el UE es la sumatoria de las señales interferentes [14].

$$P_i = \sum_{eNB=1}^K \frac{P_{TXi} G_i}{L_i} \quad (1.1)$$

Donde,

P_i Potencia de interferencia co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNodeB vecinos. Unidades: Watts.

P_{TXi} Potencia de transmisión del eNodeB vecino que afecta al usuario objetivo. Unidades: Watts.

G_i Ganancia de antena del eNodeB vecino percibida por el usuario objetivo. Es adimensional.

L_i Pérdidas de propagación desde el eNodeB vecino hasta el usuario objetivo. Es adimensional.

Los artículos [15], [16] y [17] proponen diferentes mecanismos para coordinar a los eNodeB y mitigar la interferencia inter-celda. En [18] plantean un mecanismo de ICIC a través del intercambio de mensajes entre eNodeB por medio de la interfaz X2. En [19] se contemplan 2 mecanismos para ICIC: con agregación de portadora y con multiplexación en el tiempo. Este trabajo de grado centra su investigación en mecanismos para mitigar la interferencia inter-celda, a continuación se explican diferentes técnicas de reúso de frecuencia que buscan mitigar la interferencia inter-celda en una red LTE.



1.9. TÉCNICAS DE REÚSO DE FRECUENCIA

Las Técnicas de Reúso de Frecuencia tienen como característica principal hacer una asignación de recursos dinámica y conveniente, que garantiza a cada celda una fracción de los recursos disponibles, pero además prometen mitigar la interferencia inter-celda.

Las figuras que complementan la descripción de las técnicas de reúso de frecuencia, se relacionan mediante los colores que indican el rango de frecuencias asignadas a cada sector.

1.9.1. Reúso de Frecuencia Universal

La técnica de Reúso de Frecuencia Universal (UFR, *Universal Frequency Reuse*) es la técnica con la cual trabaja LTE, donde cada una de las celdas de la red utiliza la totalidad de los recursos disponibles como se muestra en la Figura 1. 16, haciendo que dichos recursos sean aprovechados al máximo [10].

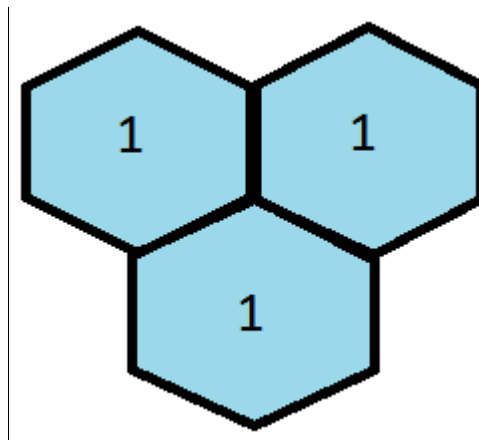


Figura 1. 16. Reúso de Frecuencia Universal. Por los Autores.

El inconveniente de utilizar UFR radica en que los usuarios ubicados en los bordes de las celdas perciben interferencia proveniente de las celdas vecinas, lo cual impide que alcancen altas velocidades de transmisión, afectando el desempeño de la red.

1.9.2. Reúso de Frecuencia Duro

El Reúso de Frecuencia Duro (HFR, *Hard Frequency Reuse*) fue implementado en las primeras tecnologías de telefonía móvil celular en las que se presentaba interferencia co-canal, se definió un grupo de celdas conocido como *cluster*, dentro de las celdas que lo conforman se reparten equitativamente los recursos. El *cluster* se va replicando a lo largo de la red, en la Figura 1. 17 se observan 3 celdas, a cada celda le corresponde un tercio del ancho de banda total disponible, representado por un color diferente.

Para definir el tamaño del *cluster* es necesario calcular la distancia de reutilización, esta distancia busca que las celdas que utilizan el mismo rango de frecuencias no se interfieran entre sí, esto permite que la interferencia inter-celda sea mitigada, pero reduce significativamente los recursos asignados a cada celda.

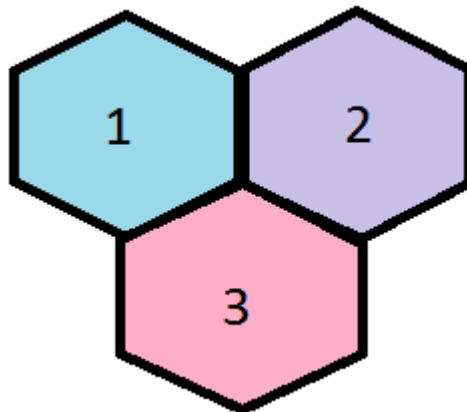


Figura 1. 17. Reúso de Frecuencia Duro. Por los Autores.

En [20] demuestran que utilizar HFR con un factor de reúso igual a 4, reduce significativamente la interferencia pero sacrifica considerablemente la eficiencia espectral, reduciendo la capacidad del sistema. Esto hace que HFR no sea una estrategia viable para LTE, ya que lograr altas velocidades de transmisión de datos es uno de los objetivos de esta tecnología.

En [21] comparan a UFR y a HFR con un factor de reúso de 3. En el borde de la celda el mejor desempeño y la menor probabilidad de sobrecargar el sistema los obtuvo HFR, ya que UFR presenta mucha interferencia inter-celda. No obstante en cuanto a capacidad UFR supera considerablemente al reúso duro, ya que este último solo utiliza un tercio del ancho de banda total en cada celda.

1.9.3. Reúso de Frecuencia Suave

El Reúso de Frecuencia Suave (SFR, *Soft Frequency Reuse*) es una técnica ampliamente conocida e implementada en algunos simuladores como Atoll².

SFR hace un uso eficiente de los recursos disponibles, utilizando en cada una de las celdas del sistema la totalidad de dichos recursos, para su asignación SFR realiza una distinción entre el centro y el borde de la celda diferenciados por el color gris para el centro y los colores amarillo, rosado y azul para los bordes, como se muestra en la Figura 1. 18, en el centro de la celda se asignan dos terceras partes de los recursos y en el borde la parte restante, en la Figura 1. 19 se observan las divisiones de los recursos disponibles, diferenciados por colores que concuerdan con la zona de la celda a la que son asignados.

En SFR a los bloques de recursos destinados al borde de la celda se les asigna una mayor potencia, con el fin de que los usuarios ubicados en esta área escuchen la señal de eNodeB al que se encuentran conectados por encima de las señales de los eNodeB vecinos.

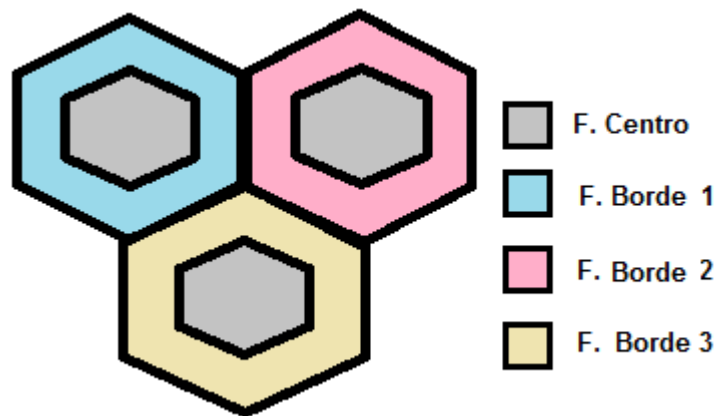


Figura 1. 18. Reúso de Frecuencia Suave. Por los Autores.

² **Atoll** fue el primer planificador de redes LTE disponible en el mercado, una de sus características es que soporta las técnicas de coordinación de interferencia inter-celda SFR y FFR [30].

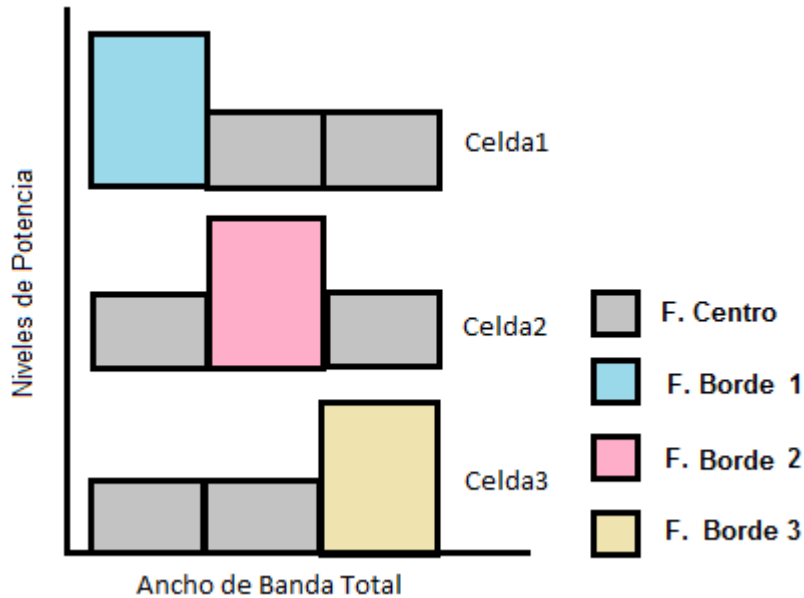


Figura 1. 19. Distribución de Frecuencias SFR. Por los Autores.

En [22] proponen una técnica de reúso de frecuencia descentralizada conocida como Reúso de Frecuencia Suave Adaptativo (ASFR, *Adaptive Soft Frequency Reuse*), realizan una comparación en cuanto a la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) y eficiencia de ancho de banda para el UL entre SFR y UFR, siendo SFR el que obtuvo mejores resultados. [23] Propone una variante para SFR, de forma que la asignación de la potencia para el borde de la celda se optimiza por medio de la implementación de un algoritmo.

En [24] realizan una comparación entre UFR, el Reúso de Frecuencia Suave, el Fraccional con un factor de reúso de 3 y el Fraccional Estricto, los resultados muestran que UFR es la técnica que permite alcanzar mayor capacidad en el sistema, el reúso fraccional con un factor de reúso de 3 es la técnica que proporciona mayor calidad, pero el reúso de frecuencia suave es considerado como el mejor candidato, ya que mejora el desempeño de los usuarios del borde de la celda sin sacrificar significativamente la capacidad de la red.

En [25] se compara el desempeño entre el reúso de frecuencia suave y fraccional, dando como resultado que SFR tiene un mejor desempeño y hace un uso más eficiente de los recursos.

1.9.4. Reúso de Frecuencia Parcial

El Reúso de Frecuencia Parcial (PFR, *Partial Frequency Reuse*) hace una diferenciación entre el centro y el borde de la celda al igual que otras técnicas de reúso, con la diferencia que PFR divide el borde de la celda en 3 sectores y a cada sector le asigna una banda de frecuencia diferente, como se muestra en la Figura 1. 20.

La asignación de frecuencias se hace según se muestra en la Figura 1. 21, una porción de ancho de banda es asignada al centro de las celdas de la agrupación, el ancho de banda restante se divide en 3 secciones y cada una se asigna a una de las tres divisiones en el borde de la celda.

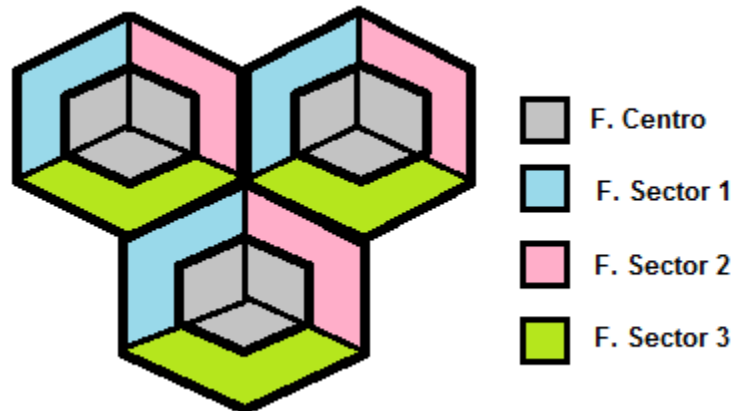


Figura 1. 20. Reúso de Frecuencia Parcial. Por los autores.

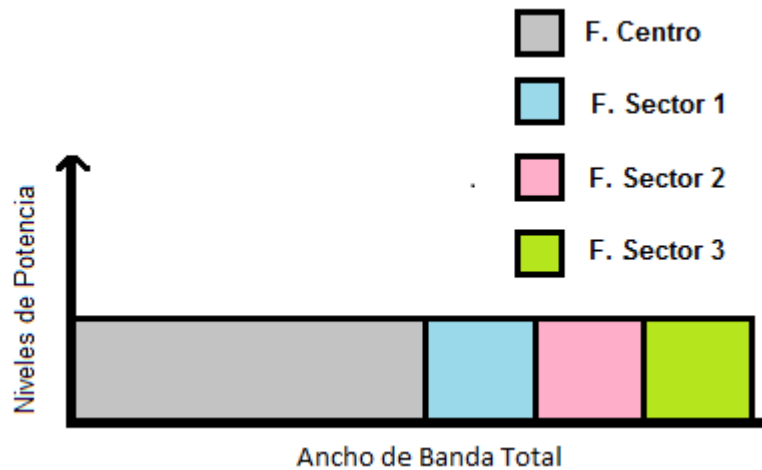


Figura 1. 21. Distribución de Frecuencia PFR. Por los autores.

En PFR las celdas utilizan la totalidad de los recursos disponibles, por lo tanto es muy eficiente en cuanto a la reutilización de los recursos disponibles, pero es una técnica difícil de implementar.

La sectorización permite aumentar la capacidad del sistema y disminuir la probabilidad de bloqueo, además es utilizada para aumentar la ganancia en UL y disminuir la interferencia Inter-Celda [26]. El problema de la sectorización en el borde de la celda está en que la complejidad de implementación y el aumento de los costos.

En [27] consideran que PFR es la técnica de reúso de frecuencia más prometedora, se plantea que una porción de los recursos asignados al borde de la celda, podrían ser utilizados por los usuarios en el centro sí es necesario. Aplicando esta consigna PFR mejora su desempeño en comparación con PFR tradicional.

1.9.5. Reúso de Frecuencia Fraccional

El Reúso de Frecuencia Fraccional (FFR, *Fractional Frequency Reuse*) trabaja con un factor de reúso de 3 y con diferentes niveles de potencia, dándoles a los usuarios ubicados en los bordes de las celdas, bloques de recursos con mayor potencia que a los usuarios ubicados en el centro.

La Figura 1. 22 muestra que la celda se divide en dos anillos que diferencian el borde del centro de la celda. La asignación de los recursos se observa en la Figura 1. 23, en el centro de la celda se asigna la mitad de los recursos y en el borde 1/6.

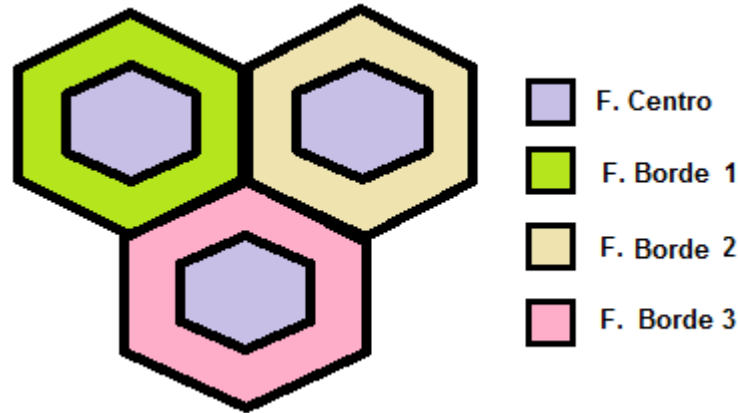


Figura 1. 22. Reúso de Frecuencia Fraccional 3. Por los autores.

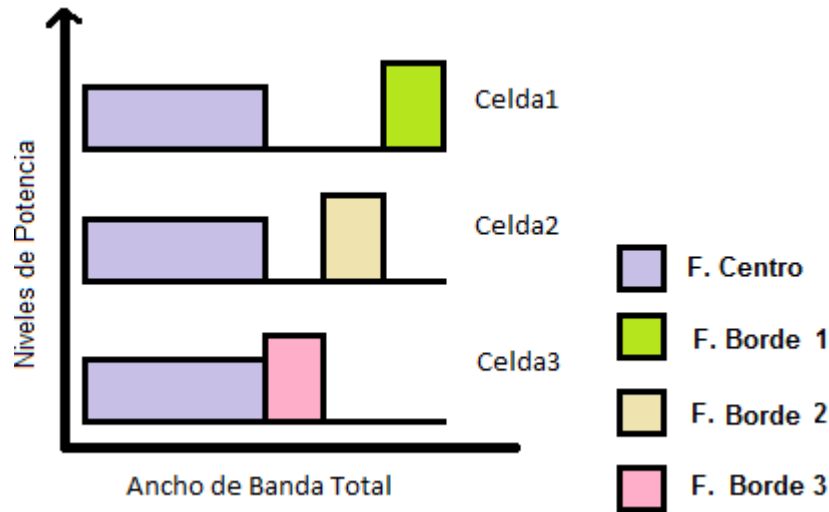


Figura 1. 23. Distribución de Frecuencias FFR 3. Por los autores.

En [28] explican que la utilización de FFR mejora la velocidad y la cobertura para los usuarios ubicados en el borde de la celda, además mejora el desempeño de la red, FFR es considerada como un punto medio entre HFR y SFR.

[29] Concluye que FFR logra mitigar la interferencia inter-celda percibida en los bordes de la celda, favoreciendo el desempeño de los usuarios del borde. Las simulaciones que se realizaron en este trabajo se hicieron con el simulador LTE de Viena a nivel de sistema.

Existen 2 tipos de reúso de frecuencia fraccional, el estricto y el suave. El reúso de frecuencia fraccional suave hace la misma distinción de la posición de los usuarios que el estricto, pero permite que los usuarios del centro de la celda utilicen los recursos de los usuarios del borde, con una menor potencia, esta estrategia mejora la eficiencia espectral, pero aumenta la interferencia.



El reúso de frecuencia fraccional estricto hace una diferenciación entre los usuarios en el centro y el borde de la celda y trabaja con los mismos niveles de potencia. El reúso de frecuencia fraccional estricto muestra mejores resultados que UFR y HFR. Esta técnica de reúso de frecuencia es implementada por el simulador Atoll [30].

1.9.5.1. Reúso de Frecuencia Estricto

El Reúso de Frecuencia Estricto (StFR, *Strict Frequency Reuse*) hace una distinción entre el centro y el borde de la celda como se muestra en la Figura 1. 24. Los recursos totales se dividen en 2, la primera parte se asigna al centro de la celda y la segunda es dividida nuevamente en 3, cada una de estas partes es asignada a los bordes de las 3 celdas que conforman la agrupación, como se muestra en la Figura 1. 25.

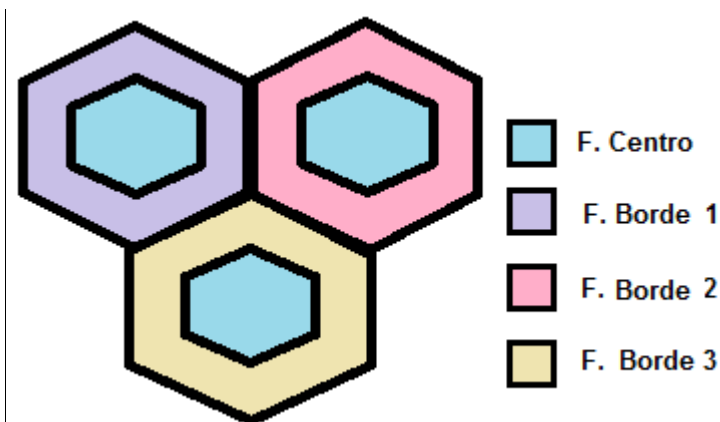


Figura 1. 24. Reúso de Frecuencia Estricto. Por los Autores.

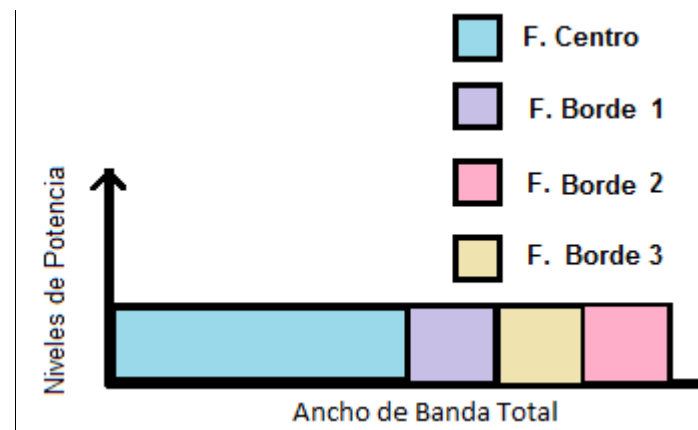


Figura 1. 25. Distribución de Frecuencias StFR. Por los Autores.



Esta técnica tiene resultados positivos en cuanto a la mitigación de la interferencia, pero no es eficiente en el aprovechamiento de los recursos disponibles.

En [31] se hace una comparación entre reúso de frecuencia estricto y suave. Al evaluar probabilidad de cobertura y tasa promedio, resaltan que el reúso de frecuencia estricto es superior en cuanto a la reducción de la interferencia inter-celda, mientras que el reúso de frecuencia suave tiene un mejor manejo de los recursos disponibles.

StFR es una técnica sencilla de implementar, eficaz en la reducción de la interferencia inter-celda y brinda a cada celda de la agrupación aproximadamente el 66% de los recursos disponibles. El simulador desarrollado por la Universidad de Vienna [32] implementa esta técnica de reúso de frecuencia.

1.9.5.2. Reúso de Frecuencia Fraccional 1.5

El Reúso de Frecuencia Fraccional con un factor de reúso de 1.5, se diferencia de otras técnicas de reúso de frecuencia, ya que no solo hace una diferenciación entre los usuarios del centro y del borde de la celda, sino que contempla 3 radios diferentes como se muestra en la Figura 1. 26. La distribución de los recursos de la red se muestra en la Figura 1. 27, donde una porción del ancho de banda se asigna en el centro de las celdas (F. Centro), el ancho de banda restante se divide en 3 (F.1, F.2 y F.3) y 2 de estas tres divisiones son asignadas a los 2 radios del borde de la celda.

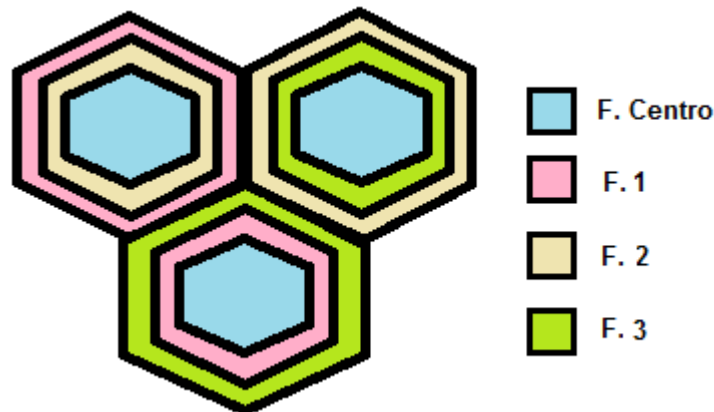


Figura 1. 26. Reúso de Frecuencia Fraccional 1.5. Por los autores

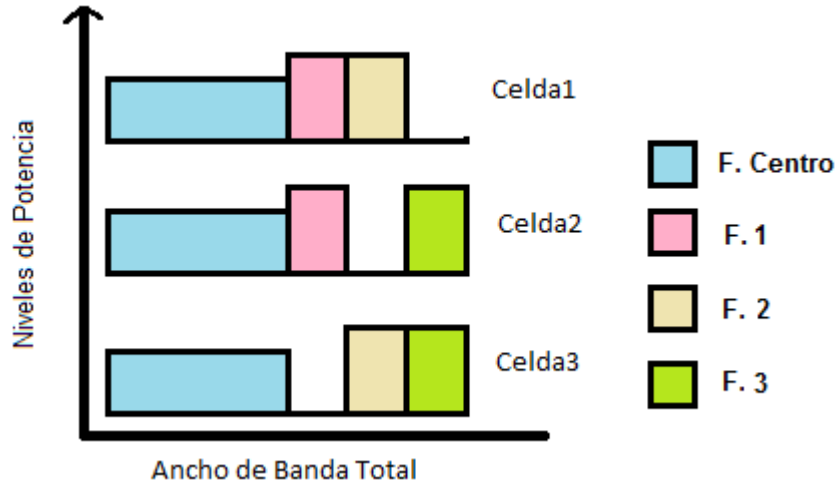


Figura 1. 27. Distribución de Frecuencias FFR 1.5. Por los autores.

En [33] plantean un factor de reúso para FFR de 1.5 y demuestran que la eficiencia espectral mejora en un 33% con respecto al factor de reúso de 3. Esta técnica permite mitigar la interferencia inter celda y tiene una mejor eficiencia espectral con respecto a FFR tradicional.

1.9.6. Reúso de Frecuencia Incremental

El reúso de frecuencia incremental divide en 9 segmentos los recursos disponibles, a cada celda se le asignan 4 de estos segmentos, esta técnica contempla 3 celdas para la reutilización, como se observa en la Figura 1. 28.

La asignación de los recursos se muestra en la Figura 1. 29, y se reparte de la siguiente forma: el primer y último segmento de cada celda son compartidos con una celda vecina.

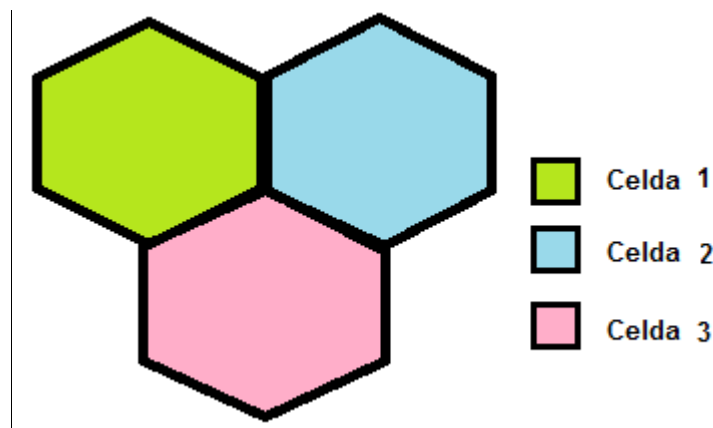


Figura 1. 28. Reúso de Frecuencia Incremental. Por los autores.

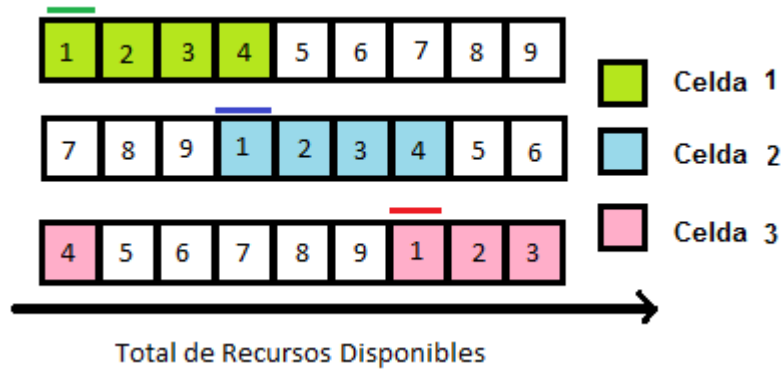


Figura 1. 29. Distribución de Frecuencias IFR. Por los autores.

Esta técnica de reúso de frecuencia presenta problemas de desempeño en escenarios con mucha demanda de tráfico, dejándola por debajo de las técnicas SFR y HFR [34].

1.9.7. Reúso de Frecuencia Cooperativo

Esta técnica además de hacer una distinción entre el centro y el borde de la celda, divide el borde de la celda en 6 sectores como se muestra en la Figura 1. 30, la asignación de los recursos disponibles se hace dividiendo el ancho de banda total como se muestra en la Figura 1. 31, el segmento más grande pertenece al centro de las celdas, los tres segmentos restantes corresponden a los bordes de las celdas. A cada borde se le asignan 2 de estos segmentos y se intercala su asignación a lo largo de las 6 divisiones del borde.

El reúso de frecuencia cooperativo permite implementar algunas de las características de la Coordinación Multipunto³ (CoMP *Coordinated Multipoint*), pero con esta técnica de reúso de frecuencia no se alcanza todo el potencial teórico de CoMP [34].

³ CoMP es una nueva tecnología basada en MIMO que busca aumentar las tasas de transmisión y mitigar la interferencia mejorando el desempeño de la red [39].

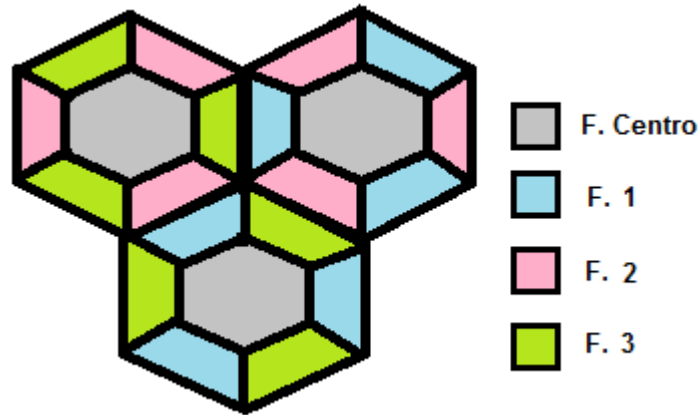


Figura 1. 30. Reúso de Frecuencia Cooperativo. Por los autores.

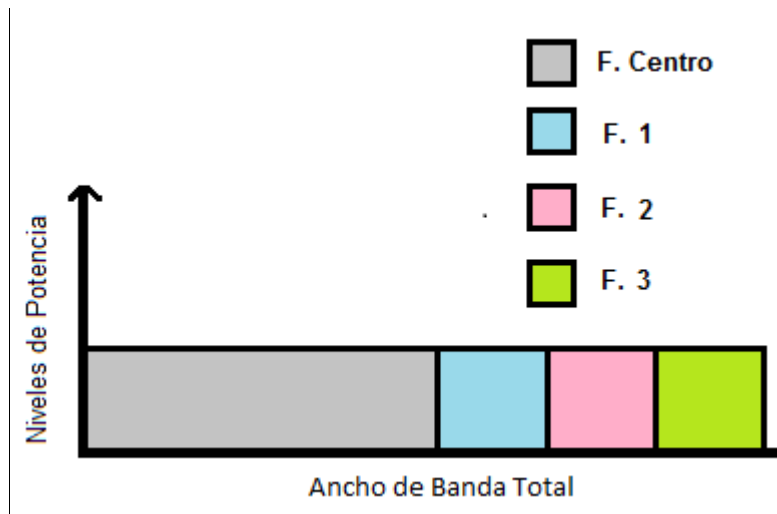


Figura 1. 31. Distribución de Frecuencias CFR. Por los autores.

Las técnicas de reúso de frecuencia expuestas anteriormente serán evaluadas en la sección 2.3.1., seguido de la selección de las más apropiadas a implementar en el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE DESARROLLO

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el proceso de diseño e implementación de la tercera versión del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, además se plantean los requisitos del sistema, asimismo se realiza una caracterización de los algoritmos que conforman el bloque de capacidad del simulador mediante casos de usos y por medio de diagramas de bloques se muestra un esquema general del simulador y del bloque de capacidad en específico.

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo es el Proceso Racional Unificado (RUP, *Rational Unified Process*), RUP tiene como ventajas que se basa en casos de uso y que trabaja con un diseño iterativo. En la Figura 2.1 se muestran las fases de desarrollo que se contemplan y el papel de los casos de uso en cada una de estas.

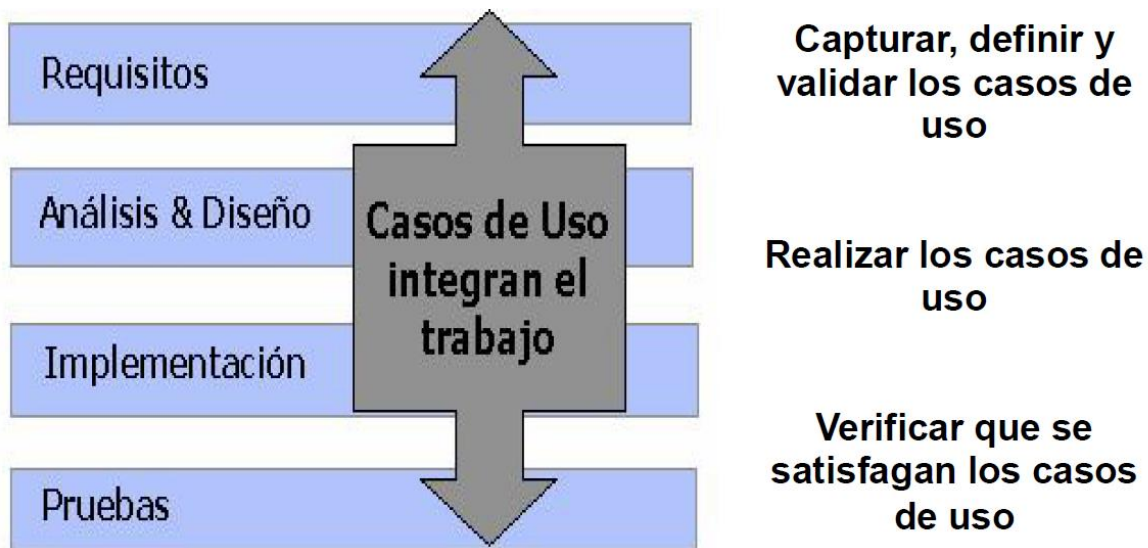


Figura 2. 1. Metodología RUP. Tomada de: [33]

Para la elaboración de los casos de uso del sistema primero se realiza un análisis de requerimientos, estos pueden ser funcionales o no funcionales y permiten enumerar las diferentes características del sistema.



2.2. REQUERIMIENTOS

Para el estudio de los requerimientos, es necesario iniciar con la explicación del problema de estudio, seguidamente se definen los requerimientos funcionales y no funcionales planteados para el Simulador Versión 3.

2.2.1. Problema de Estudio

En el ámbito académico son pocos los simuladores que permiten estudiar el comportamiento de las redes LTE y menos frecuentes aún son aquellos que contemplan técnicas de ICIC.

Teniendo la segunda versión del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, surge la necesidad de mitigar el problema de la interferencia inter-celda que se presenta en esta tecnología y que degrada el desempeño de la red, especialmente en los bordes de las celdas, por medio de técnicas de reúso de frecuencia.

2.2.2. Requerimientos Funcionales

Los requerimientos funcionales del simulador representan las acciones que este es capaz de realizar y describen los procesos que se ejecutan sobre las entradas para conseguir las salidas.

Requerimiento 1: Implementar dos técnicas de reúso de frecuencia.

Requerimiento 2: Permitir la selección de la técnica de reúso de frecuencia.

Requerimiento 3: Permitir la selección de diferentes radios de la celda.

Requerimiento 4: Realizar la diferenciación de los diferentes sectores de la celda definidos por la técnica de reúso de frecuencia.

Requerimiento 5: Permitir la selección de la potencia de transmisión según el sector de la celda.

Requerimiento 6: Dividir los bloques de recursos disponibles y asignarlos al sector correspondiente.

Requerimiento 7: Mostrar resultados de desempeño de la red.



2.2.3. Requerimientos No Funcionales

Estos requerimientos son dedicados a aspectos tales como la interfaz de usuario e interfaces software, además de requerimientos necesarios para garantizar seguridad y calidad del software a desarrollar [35].

Requerimiento 8: Desplegar interfaz de usuario.

Requerimiento 9: Visualizar y asegurar el correcto funcionamiento del simulador en equipos que cuenten con el software Matlab® compatible con versión 7.3.

Requerimiento 10: Asegurar un sistema con usabilidad.

Requerimiento 11: Definir el uso para el ámbito académico.

2.3. DISEÑO

En esta sección se describen las características del simulador y las funciones que realiza para satisfacer los requerimientos planteados. Con la ayuda de diagramas de flujo se muestra un bosquejo paso a paso de cómo funciona el simulador y como serán implementadas las técnicas de reúso de frecuencia seleccionadas.

2.3.1. Selección de las Técnicas de Reúso de Frecuencia

Para la selección de las técnicas de reúso de frecuencia se definieron una serie de criterios o características apropiadas para la implementación en el simulador. Estos criterios se utilizan como referencia al momento de la selección de las técnicas de reúso. A continuación se explican los criterios de selección empleados para evaluar las técnicas de reúso de frecuencia.

2.3.1.1. Criterios de Selección

Estos son los criterios que se consideraron pertinentes para la evaluación:

- **Popularidad:** Se buscan las técnicas utilizadas en el ámbito académico ya que el simulador será utilizado en dicho ámbito.
- **Innovación:** Las técnicas de reúso de frecuencia deben aportar una mejora al desempeño de LTE.



- **Implementación en otros Simuladores:** Como referencia es importante saber cuáles son las técnicas que han sido implementadas por otros simuladores, tanto en el ámbito académico como en el comercial, debido a que permite analizar la factibilidad y complejidad de implementación a nivel de simulación.
- **Vigencia:** Se debe analizar si las técnicas de reúso de frecuencia son compatibles con los requerimientos de las versiones anteriores del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.
- **Eficiencia Espectral:** La técnica de reúso de frecuencia debe permitir alcanzar una alta eficiencia espectral.
- **Mitigación de Interferencia:** La técnica de reúso de frecuencia debe mitigar la interferencia que se percibe en los bordes de la celda.
- **Desempeño:** Se debe comparar si los resultados obtenidos en el desempeño del sistema, son mejores al implementar UFR u otra técnica de reúso de frecuencia.

De acuerdo con los criterios de selección definidos, se eligieron dos técnicas de reúso de frecuencia: Reúso de Frecuencia Suave y Reúso de Frecuencia Fraccional 1.5, debido a que son las más apropiadas según los criterios de selección.

SFR es una técnica ampliamente conocida en el ámbito académico, además se destaca porque logra mitigar la interferencia que perciben los usuarios del borde de la celda sin sacrificar recursos. La base teórica de esta técnica indica que su implementación dentro del simulador es factible y se tienen ejemplos de simuladores que ya la han implementado.

FFR1.5 se caracteriza por definir 3 radios dentro de la celda con el fin de realizar una mejor distribución de los recursos, pero no es una técnica muy conocida en el ámbito académico, a diferencia de FFR que es la técnica a la que FFR1.5 pretende mejorar. La implementación de esta técnica comparada con la de SFR es más complicada, no obstante se espera mejorar los resultados en cuanto a velocidades de transmisión de datos y mitigación de interferencia inter-celda.

2.3.2. Definición del Modelo del Sistema

El Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE desarrollado previamente como trabajo de grado de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca, cuenta con características fijas, la red



simulada consiste en cuatro celdas, cada una de estas tiene un número variable de equipos de usuario (UE) que se encuentran distribuidos de manera aleatoria.

La Figura 2. 2 muestra los tres bloques que componen el simulador, estos bloques permiten realizar un análisis de cobertura, de capacidad y un análisis simultáneo de capacidad y cobertura. Se muestra además, las principales entradas y salidas del bloque de capacidad del simulador, en el que se centra este trabajo de grado.

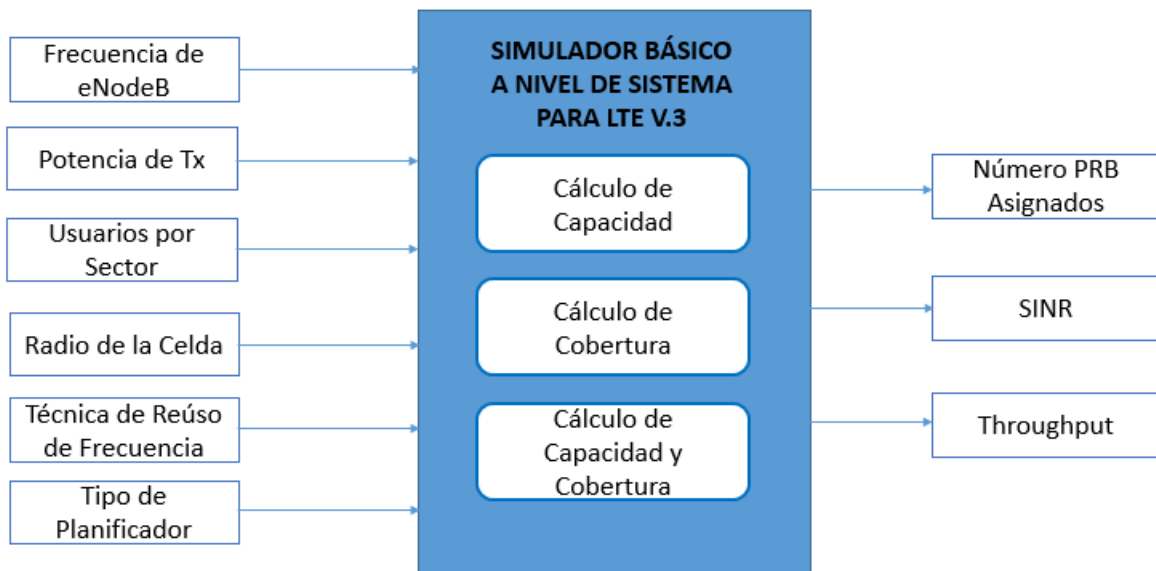


Figura 2. 2. Entradas y Salidas del Simulador. Por los Autores

En el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE Versión 3, se plantea adicionar al interior del bloque de Cálculo de Capacidad, las técnicas de reúso de frecuencia seleccionadas para el desarrollo de este trabajo de grado, en la Figura 2.3 se observa un diagrama general del interior del bloque de capacidad, este bloque se divide en las 3 técnicas de reúso, para cada una se calcula la posición de los usuarios, se realiza el cálculo de las pérdidas de propagación y de la potencia recibida por usuario para determinar junto con las potencias interferentes el valor de la SINR, con base a este valor se realiza la planificación de recursos radio y una vez asignados los PRB se despliegan las gráficas de desempeño del sistema.

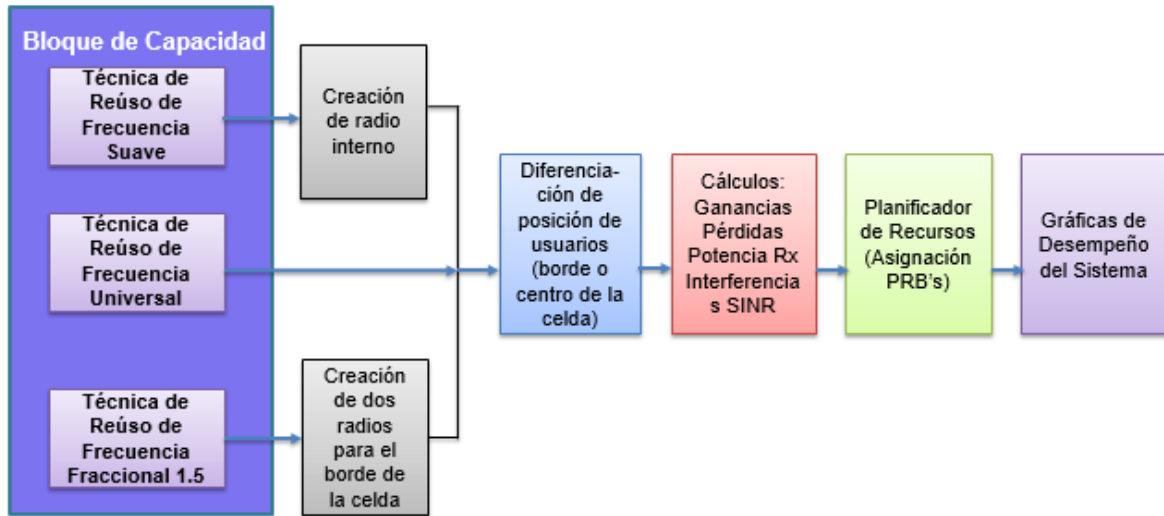


Figura 2. 3. Modelo del Sistema. Por los Autores.

2.3.3. Algoritmos del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE

Los algoritmos del simulador muestran las entradas y salidas, así como las funciones y los criterios de decisión en los que el simulador basa su funcionamiento. Es importante resaltar que los algoritmos corresponden únicamente al módulo de capacidad del simulador.

- **Algoritmo General del Simulador**

En la Figura 2. 4 se despliega el diagrama de flujo del algoritmo general del simulador, con las entradas y salidas de mayor relevancia para el análisis propuesto. Este algoritmo define inicialmente la posición del usuario, con lo cual hace una diferenciación entre el centro y el borde de la celda para asignar la subbanda y calcular las pérdidas pertinentes, el cálculo de la SINR se hace con los valores obtenidos de la potencia de recepción y las potencias interferentes, seguido de la asignación de los recursos y cálculo del *throughput*. El procedimiento anterior se realiza para cada uno de los usuarios del sistema. Las gráficas de desempeño son el último proceso del algoritmo debido a que son las encargadas de mostrar los resultados de la simulación.

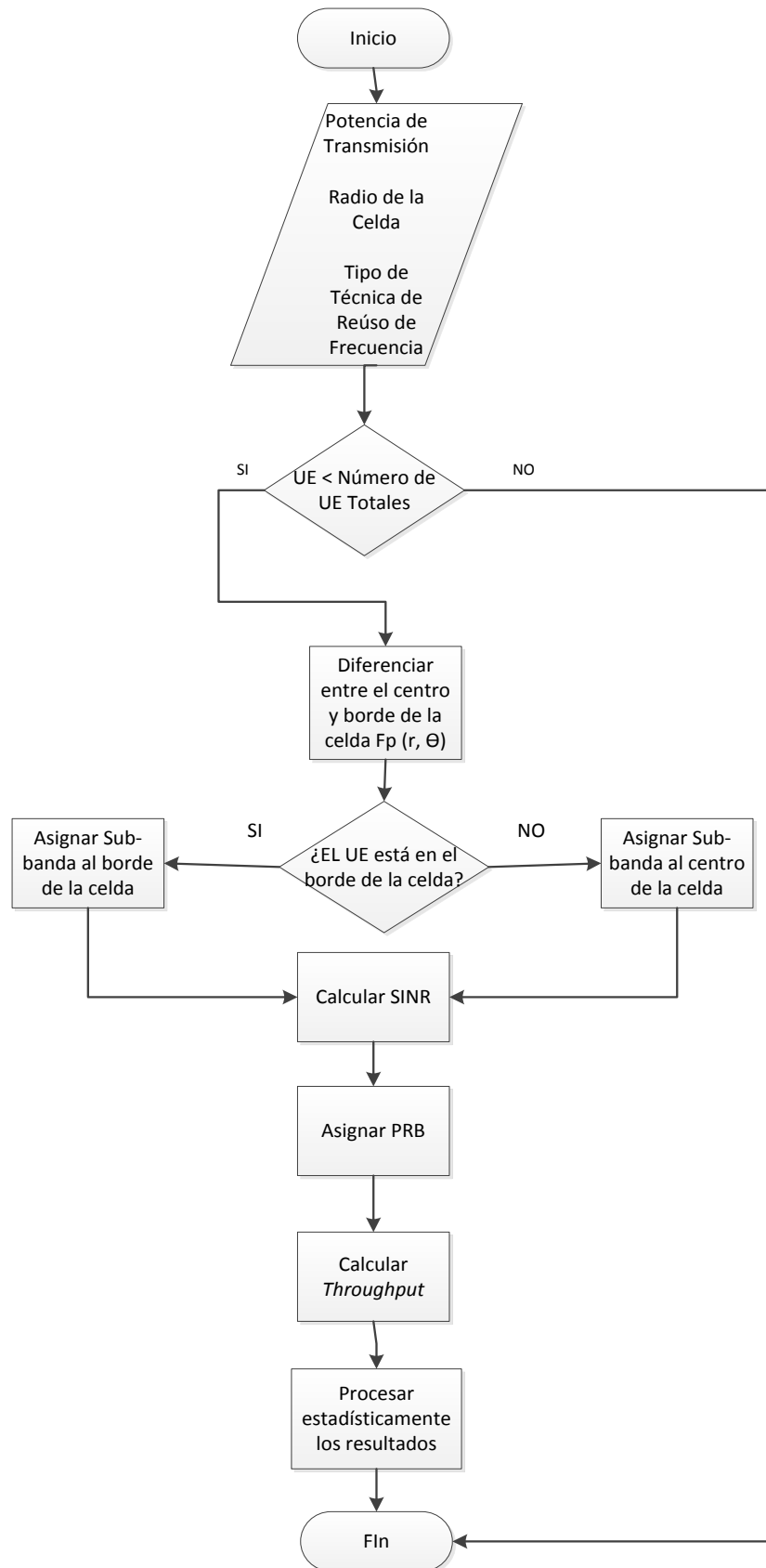
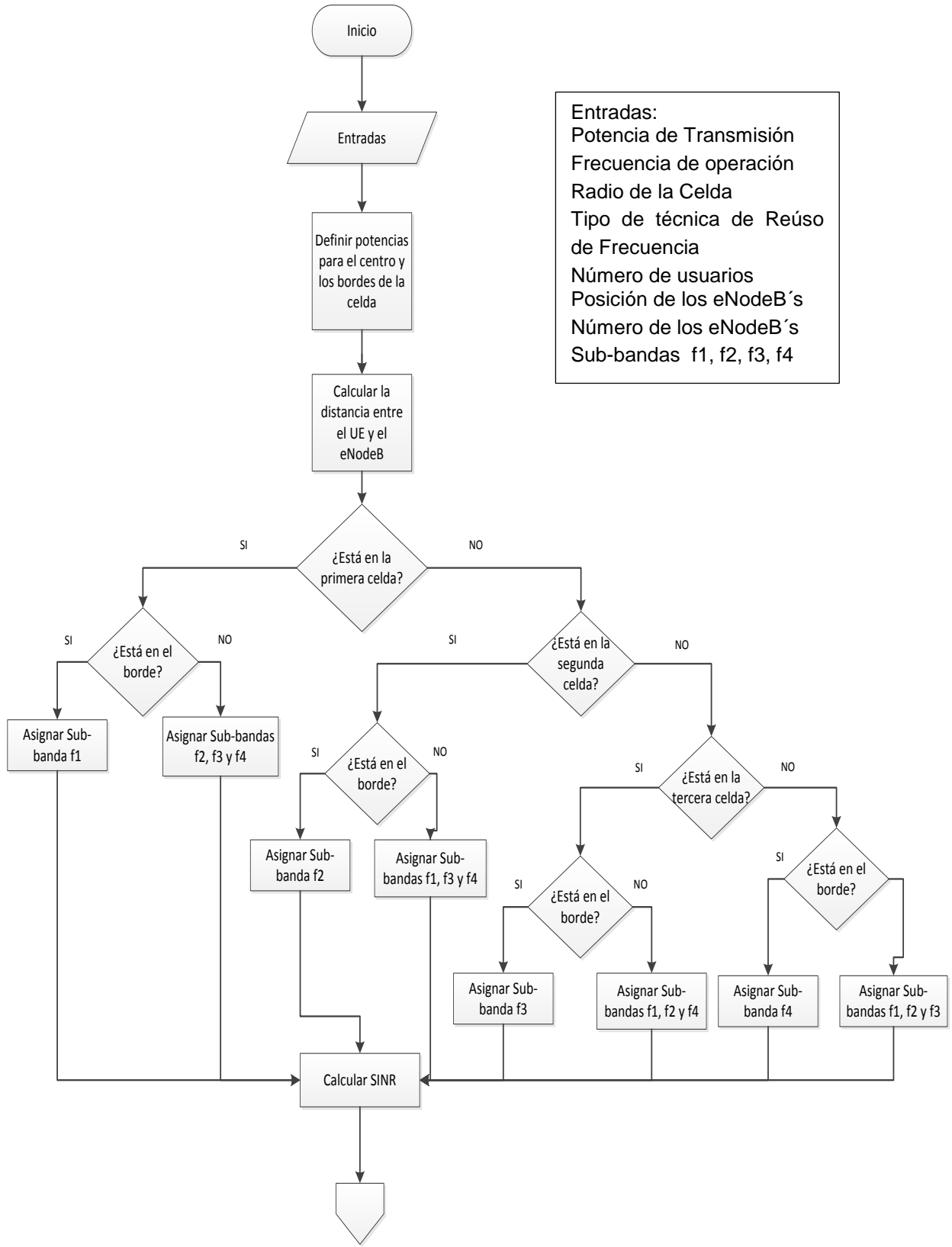


Figura 2. 4. Diagrama de Flujo General para el Simulador. Por los autores.



- **Algoritmo para Reúso de Frecuencia Suave (SFR)**

El algoritmo de SFR se muestra en la Figura 2. 5, inicialmente hace una delimitación entre el centro y el borde de la celda, para diferenciar a los usuarios según su ubicación. Las pérdidas que sufren los usuarios del centro son diferentes a las de los usuarios del borde, debido a que la distancia con el eNodeB; la potencia de transmisión y las bandas de frecuencia que tienen asignadas no son iguales, en base a las pérdidas y a la ganancia de antena se calculan las potencias de recepción tanto de la señal deseada como de las interferentes. Estas potencias y el ruido del sistema permiten calcular la SINR, con este valor se asignan los PRB correspondientes a cada UE, el número de PRB disponibles depende del área de la celda (centro y borde), se calcula el *throughput* y finalmente se despliegan las gráficas con los resultados obtenidos.



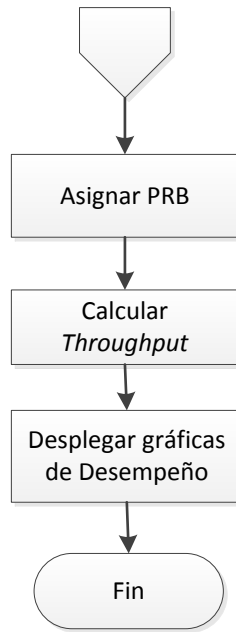


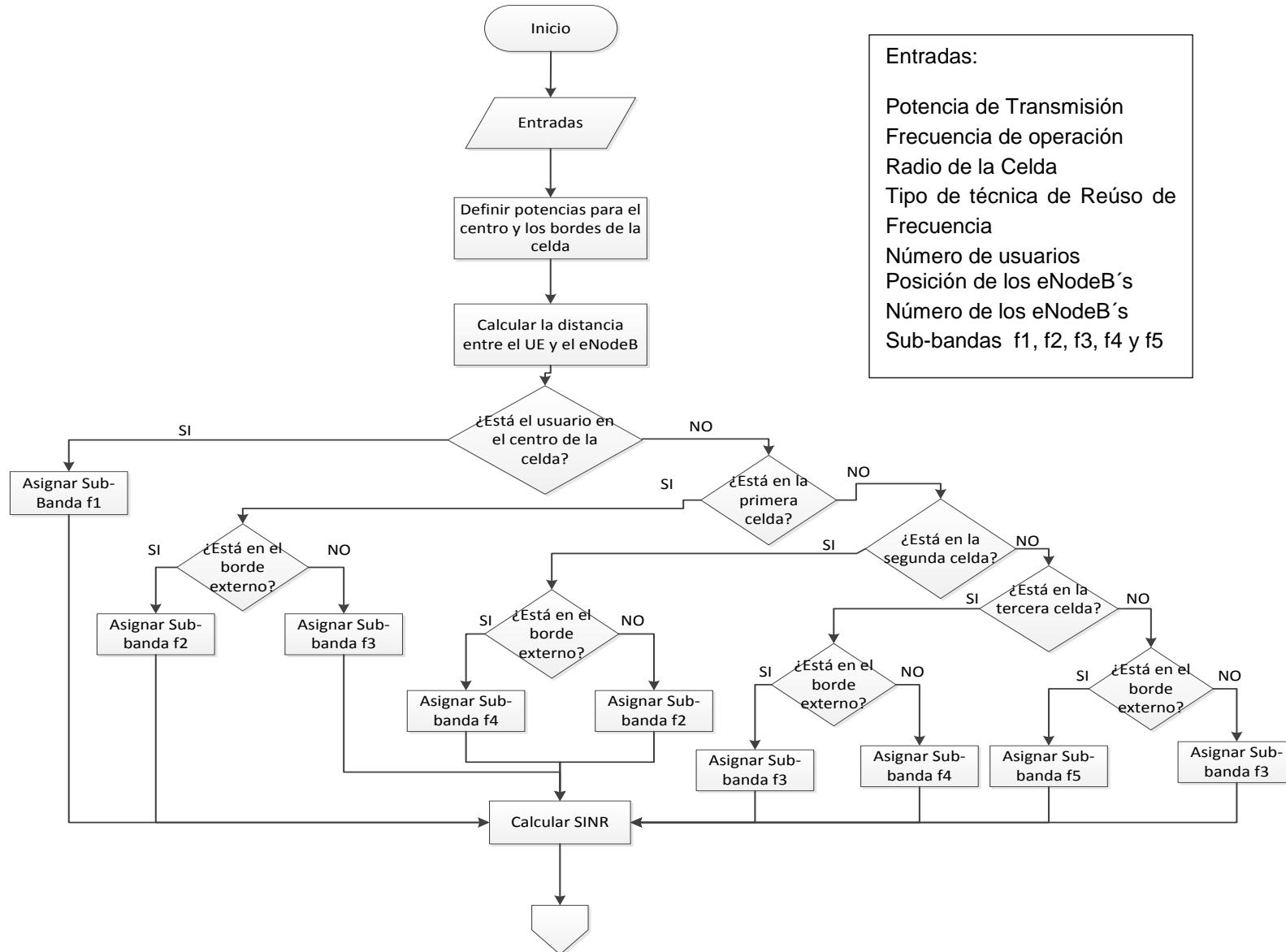
Figura 2. 5. Diagrama de Flujo para SFR. Por los autores.

- **Algoritmo para Reúso de Frecuencia Fraccional 1.5**

El algoritmo de FFR1.5 se muestra en la Figura 2. 6, en primer lugar delimita 3 radios diferentes al interior de la celda, con los cuales se define la posición del UE y se le asigna el número de PRB, este número depende de la SINR que es calculada con la potencia en recepción de las señales deseadas e interferentes, además del ruido del sistema. Una vez realizado este proceso para todos los usuarios se procede a calcular el valor del *throughput* y se despliegan las gráficas con los resultados obtenidos.



Algoritmo de Reúso de Frecuencia para el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE
María Manuela Silva Zambrano – Valentina Giselle Moreno Parra



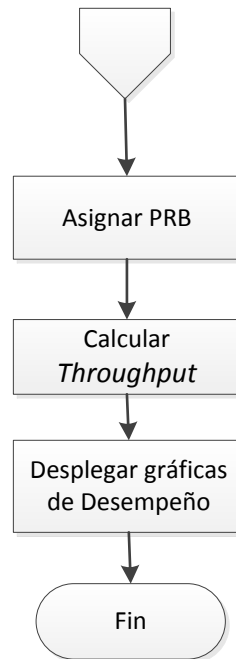


Figura 2. 6. Diagrama de Flujo para FFR 1.5. Por los autores.

2.4. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se dan a conocer los procesos y funciones desarrolladas en la implementación del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE Versión 3, una vez seleccionada la herramienta de simulación, se aplican las funciones descritas en los algoritmos del bloque de capacidad.

2.4.1. Herramienta de Simulación

Se hace uso del software matemático comercial Matlab® [36] que brinda la posibilidad de integrar nuevas funciones en los módulos del simulador, además permite modificar la interfaz gráfica y procesar los datos obtenidos para generar gráficas y curvas que facilitan el análisis del desempeño del sistema.

2.4.2. Cálculo de Capacidad

En esta sección se explican las diferentes funciones que se modificaron o se agregaron al módulo de capacidad para hacer un análisis de las técnicas de reúso de frecuencia en el sistema.

- **Definición del Escenario**

El escenario está planteado en un plano de tres dimensiones (ejes x, y, z), puede estar conformado por cuatro, siete o nueve celdas en forma de hexágono y sectorizada en tres partes cada una, las celdas se encuentran ubicadas sobre los ejes X y Y y el eNodeB se representa con una altura en el eje Z. El radio de la celda se ingresa por el usuario desde la interfaz y se usa para todas las celdas. En la Figura 2. 7 se muestra el escenario con 4 celdas y la forma en la que están enumeradas.

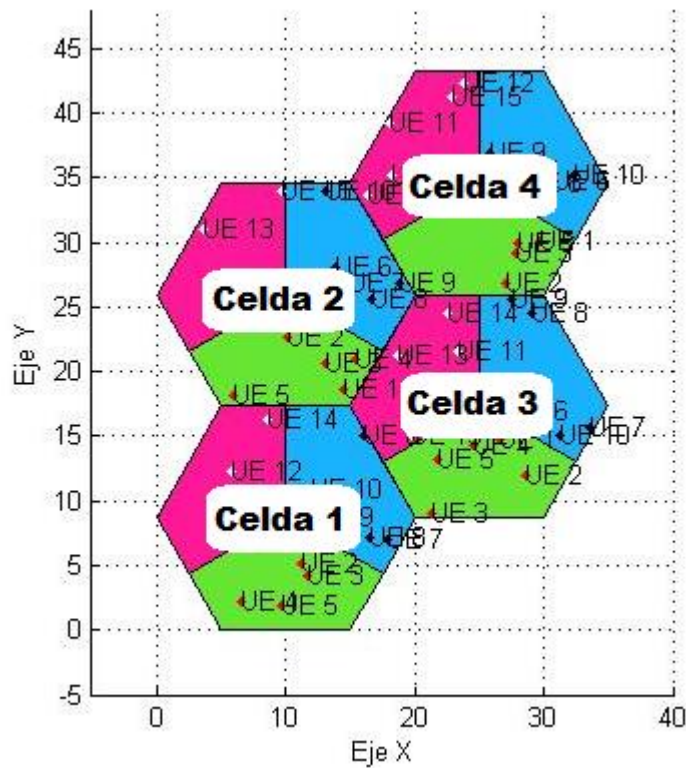


Figura 2. 7. Numeración de las Celdas del Sistema. Por los autores.

- **Diferenciación de Usuarios**

Los usuarios se asignan por sector, el número total de usuarios por celda equivale al número de usuarios por sector, parámetro que ingresa el usuario, multiplicado por el número de sectores dentro de la celda. Esta asignación se realiza de forma aleatoria a lo largo de cada sector, siguiendo una distribución uniforme. Estos usuarios se clasifican según su posición, entre usuarios del centro y del borde. El número total de usuarios ubicados en el centro y en el borde de la celda, son valores que se calculan con esta función.



- **Cálculo de Distancia entre eNodeB y UE**

Las posiciones de todos los usuarios son guardadas en dos vectores, en uno de ellos se almacenan las posiciones de los UE en el centro de la celda y el otro vector tiene las posiciones del borde. Cada usuario tiene coordenadas del tipo (x, y) que son calculadas por el teorema de Pitágoras definido en la ecuación (2.2) y el ángulo es definido de acuerdo al cuadrante donde esté el usuario.

$$d = \sqrt{(X_{eNB} - X_{UE})^2 + (Y_{eNB} - Y_{UE})^2} \quad (2.2)$$

Donde,

- d Distancia entre el UE y el eNodeB, medida en metros.
- X_{eNB} Posición en el eje X del eNodeB, medida en metros.
- Y_{eNB} Posición en el eje Y del eNodeB, medida en metros.
- X_{UE} Posición en el eje X del UE, medida en metros.
- Y_{UE} Posición en el eje Y del eNodeB, medida en metros.

- **Cálculo de Pérdidas**

A partir de la distancia obtenida entre el UE y el eNodeB se realiza el cálculo de las pérdidas de la señal según las ecuaciones que describe el modelo de propagación, este es elegido entre: espacio libre, COST 231 micro urbano, COST 231 macro urbano y COST 231 macro suburbano, TR 36.942 urbano y TR 36.942 suburbano. Las pérdidas se calculan para los usuarios del centro y del borde de forma separada, debido a que la frecuencia central de las respectivas bandas de frecuencia es diferente.

- **Cálculo de Potencias Interferentes**

Para SFR el ancho de banda total disponible se divide en 3 partes, 2 de las cuales se deben asignar al centro de la celda y la parte restante al borde. Las partes asignadas al borde deben ser diferentes para cada celda, con el fin de evitar la interferencia, pero como el escenario con menor número de celdas es 4 a la celda 4 se le replica la asignación de la celda 1. Para los escenarios con un mayor número de celdas se replica alternativamente la asignación de las primeras 3 celdas. En la Figura 2. 8 se muestra la asignación para 4 celdas, con la siguiente convención Bc: Borde Celda y Cc: Centro Celda.

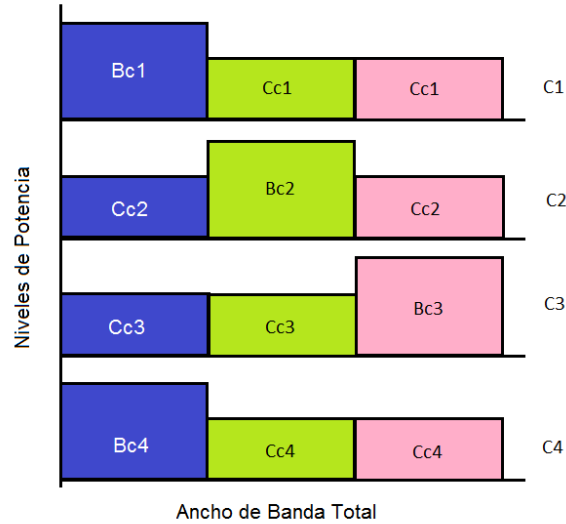


Figura 2. 8. Frecuencias para las 4 celdas con SFR. Por los autores.

Las potencias interferentes en SFR se calculan según la siguiente distribución general, para cada una de las 3 celdas originales, los usuarios ubicados en el centro de una celda perciben interferencia de los usuarios ubicados en el borde y los usuarios ubicados en el borde de dicha celda perciben interferencia de los usuarios ubicados en el centro de las otras 2 celdas. Para las otras celdas se cumple esta distribución, además perciben la interferencia de las celdas con las que comparten asignación de frecuencia.

Para FFR1.5, las potencias interferentes se calculan con las interferencias que perciben los usuarios del centro de las celdas ya que todos utilizan la misma frecuencia, bloques Cc1, Cc2, Cc3, Cc4 y en los bordes se calculan las interferencias únicamente con los que utilizan la misma frecuencia, por ejemplo, los bloques BEc1, Blc3 y BEc4. La distribución de frecuencias se muestra en la Figura 2. 9.

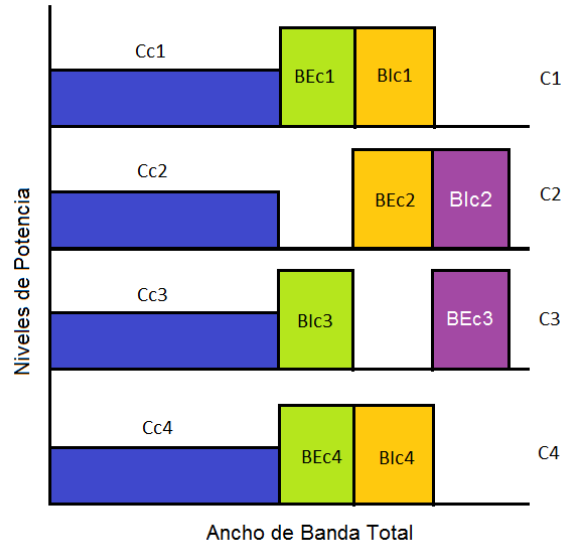


Figura 2. 9. Frecuencias para las 4 celdas con FFR1.5. Por los autores.

Las potencias interferentes se calculan teniendo en cuenta que los usuarios del centro de todas las celdas se interfieren entre sí, para los usuarios de cada uno de los bordes se analiza en qué borde de las celdas vecinas se utiliza la misma banda de frecuencia, además se deben tener en cuenta las otras celdas del sistema que tienen replicada su asignación.

- **Cálculo de SINR**

La SINR se calcula con la potencia de recepción de cada usuario, la potencia de ruido térmico del sistema y ancho de banda asignado al usuario. La relación de estos parámetros se observa en la ecuación (2.3).

$$SINR = \frac{P_{Rx}}{P_I + P_N} \quad (2.3)$$

Donde,

$SINR$ Relación Señal a Interferencia más Ruido percibida por el UE elegido en eNodeB específico. Adimensional.

P_{Rx} Potencia de Recepción del UE elegido, medida en Watts.

P_I Potencia Interferente percibida por el UE elegido de los eNodeB vecinos, medida en Watts.

P_N Potencia de Ruido Térmico del sistema, medida en Watts.

El cálculo de SINR se realiza de forma separada para los usuarios del centro y los usuarios del o de los bordes de la celda. La SINR total se calcula sumando las anteriores.



- **Asignación de Bloques de Recursos**

Para la asignación de PRB a cada usuario, se modificaron las funciones originales de los planificadores con el fin de realizar la asignación de forma simultánea para los diferentes usuarios sin importar su ubicación. Los números de PRB disponibles y de usuarios en el centro son diferentes a los números de PRB y de usuarios del o de los bordes, pero el planificador utiliza estos datos por separado y según la posición del usuario y sus características realiza la asignación.

- **Tratamiento Estadístico de Datos**

Se procesan los resultados haciendo uso del método Montecarlo⁴ que hace repeticiones de un proceso con parámetros aleatorios, de esta manera se obtienen diferentes resultados en una simulación.

Los datos obtenidos mediante el método de Montecarlo, se procesan mediante las funciones estadísticas: Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) y Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*); y las distribuciones estadísticas: varianza, mediana y media para realizar el análisis.

2.5. PRUEBAS DEL SIMULADOR

En la Tabla 2. 1. se muestran los parámetros variables del módulo de capacidad del simulador que el usuario elige desde la interfaz y que serán utilizados en los casos de estudio del siguiente capítulo.

⁴ El método Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias [49].



Tabla 2. 1. Parámetros Variables del Simulador.

Parámetros Variables	Valores
Tipo de Antena	Katherein 742215 Katherein 80010681 TR 36.942
Tipo de Desvanecimiento	Lento, Rápido
Modelo de Propagación	Espacio libre COST 231 <i>Urban</i> macro COST 231 <i>Urban</i> micro COST 231 <i>Suburban</i> macro TR 36.942 Urbano TR 36.942 Suburbano
Ancho de Banda de la Celda (MHz)	3, 5, 10, 15, 20
Frecuencia del eNodeB (MHz)	1720, 1900, 2500
Tipo de Planificador	<i>Round Robin</i> (RR) <i>Proportional Fair</i> (PF) <i>Maximum Rate</i> (MR) RR, PF y MR
Técnica de Reúso de Frecuencia	Reúso de Frecuencia Universal (UFR) Reúso de Frecuencia Suave (SFR) Reúso de Frecuencia Fraccional 1.5 (FFR 1.5)
SINR Objetivo	-4.7, 0.2, 4.3, 8.1, 11.7, 16.3, 21
Potencia de Transmisión (W)	20, 40
Número de Celdas	4, 7, 9
Número de Usuarios por Sector	Limitado por el ancho de banda seleccionado
Radio de la celda (m)	Seleccionado por el usuario

Las pruebas realizadas al simulador para verificar su correcto funcionamiento se encuentran en el Apéndice B de este trabajo.



CAPÍTULO 3: CASOS DE ESTUDIO

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se evalúa el desempeño en términos de capacidad de un sistema LTE con técnicas de reúso de frecuencia, haciendo uso de la tercera versión del simulador básico a nivel de sistema para LTE.

La tercera versión del simulador básico a nivel de sistema para LTE integra las técnicas de reúso de frecuencia SFR y FFR1.5 al módulo de capacidad que ya cuenta con la técnica UFR, además el simulador tiene 3 planificadores de recursos radio, *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF) y *Maximun Rate* (MR).

El análisis sobre las técnicas de reúso de frecuencia se centra en su comportamiento en términos de capacidad, haciendo énfasis en la interferencia inter-celda.

La capacidad del sistema se evalúa según la velocidad de transmisión alcanzada, analizadas con el fin de observar el efecto de la mitigación de la interferencia inter-celda en el *throughput* del sistema, al comparar las técnicas SFR y FFR1.5 con UFR.

También se realiza la evaluación de la capacidad a partir del número de usuarios atendidos por medio del planificador MR, este número se promedia y se compara con el número de usuarios totales, con el fin de conocer el porcentaje de usuarios al que se le presta el servicio e identificar así la eficiencia en la asignación de los recursos dentro del sistema. Sin embargo, este análisis no es relevante para los planificadores PF y RR, debido a que asignan recursos a todos los usuarios y su eficiencia es del 100 %.

De forma complementaria se analiza la Función de Distribución Acumulativa de la SINR del sistema, para evidenciar la mitigación de la interferencia inter-celda que realizan las técnicas SFR y FFR1.5. Este análisis parte de la SINR objetivo y se complementa con el percentil 10 de la Función de Distribución Acumulativa de la SINR total del sistema, que indica el valor mínimo de SINR que tiene el 90 % de los usuarios del sistema.

Con el fin de obtener resultados representativos y confiables, el simulador realiza 500 iteraciones, por cada iteración se envían 10 sub-tramas, mostrando curvas estadísticas calculadas a partir del método de Montecarlo.



3.2. ESCENARIO 1

El objetivo de este escenario es evaluar el comportamiento de las técnicas de reúso de frecuencia y su capacidad de mitigar la interferencia inter-celda, variando el radio de la celda y el número de usuarios por sector.

En la Tabla 3. 1 se observan los parámetros configurados como fijos en el módulo de capacidad del simulador.

Tabla 3. 1. Parámetros Fijos Capacidad Escenario 1.

Parámetro		Valor
Tipo de Antena		<i>Katherein 742215</i>
Desvanecimiento		Lento
Modelo de Propagación		COST 231 Micro Urbano
Frecuencia		1710 MHz
Potencia Tx		40 W
Ancho de Banda		20 MHz
Planificadores		RR,PF,MR
SINR Objetivo		8,1 dB
Número de Celdas		4
SFR	Porcentaje Radio Borde	30 %
	Porcentaje Potencia Borde	20 %
FFR1.5	Porcentaje Radio Borde Externo	10 %
	Porcentaje Radio Borde Interno	40 %
	Porcentaje Potencia Borde	10 %

La SINR objetivo se selecciona a partir de la especificación TS 136 213, en la cual se establece que para un valor de 8.1 dB, los usuarios pueden utilizar modulaciones como 16 y 64 QAM [37]. El valor de la SINR objetivo es relevante para la técnica UFR, ya que los usuarios de los sistemas con las técnicas SFR y FFR 1.5 superan en todos los casos el valor de 8.1 dB.

El radio de la celda se varía entre: 100, 250, 500, 1000 y 5000 m, dado que al aumentar el radio, el número de usuarios dentro de la misma aumenta, se toman 8, 15, 20, 30 y 33 usuarios por sector, siendo 33 el número máximo de usuarios a los que se les puede garantizar la mínima asignación de recursos, con un ancho de banda de 20 MHz.



3.2.1. Análisis de la SINR del Sistema y Número de Usuarios Atendidos

En la Figura 3. 1 se muestran las funciones de distribución acumulativa de SINR para las tres técnicas de reúso de frecuencia analizadas, los resultados desplegados en esta figura se obtuvieron para un radio de 100 m y 8 usuarios por sector.

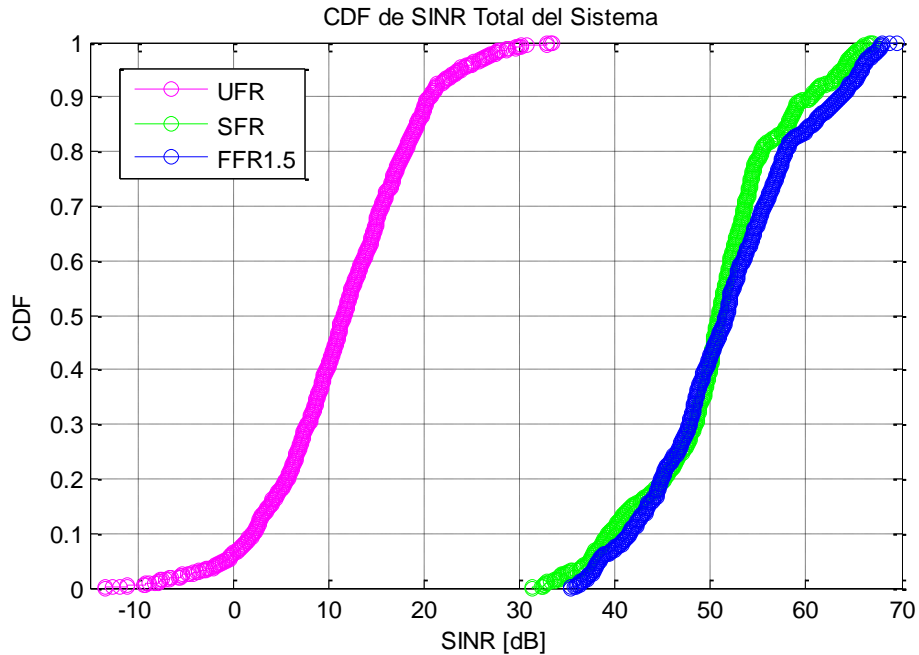


Figura 3. 1. CDF de SINR Total del Sistema.

En la Figura 3. 1 se muestra que en el sistema con la técnica UFR aproximadamente el 65 % de los usuarios superan la SINR objetivo, mientras que con las técnicas SFR y FFR1.5 el 100 %. Al analizar el percentil 10 de la Función de Distribución Acumulativa de la SINR, con UFR el 90 % de los usuarios tiene una SINR superior a 0 dB, mientras que con las técnicas SFR y FFR1.5 el 90 % de los usuarios tiene un valor superior a 41 dB y 43 dB respectivamente.

En la Tabla 3. 2 se presentan los resultados obtenidos de SINR del sistema con las diferentes configuraciones de radio y número de usuarios por sector. Los resultados consignados en esta tabla se evidencian en las figuras del Anexo B.



Tabla 3. 2. Resultados de SINR del Escenario 1.

RESULTADOS		CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
		100 m	250 m	500 m	1000 m	5000 m
		8 UE	15 UE	20 UE	30 UE	33 UE
UFR	SINR objetivo [%]	70	70	60	30	1
	Percentil 10 SINR [dB]	2	0	0	-8	-33
	Porcentaje Usuarios Atendidos [%]	57.2	64.1	59.2	27.7	1.8
SFR	SINR objetivo [%]	100	100	100	100	100
	Percentil 10 SINR [dB]	40	51	60	73	91
	Porcentaje Usuarios Atendidos [%]	64.4	58	53.4	31	53.3
FFR1.5	SINR objetivo [%]	100	100	100	100	100
	Percentil 10 SINR [dB]	41	52	63	75	93
	Porcentaje Usuarios Atendidos [%]	71.1	61.8	53.5	34.4	29.7

De acuerdo a la Tabla 3. 2, los resultados de la SINR del sistema representados mediante la Función de Distribución Acumulativa muestran que en los sistemas con las técnicas SFR y FFR1.5 el 100 % de los usuarios supera el valor de SINR objetivo, mientras que al utilizar la técnica UFR este valor decrece del 70 % al 1 % conforme aumenta el radio de la celda, lo que indica que las condiciones del canal percibidas por los usuarios empeoran drásticamente conforme se aumenta el radio cuando no se utilizan técnicas de mitigación de interferencia inter-celda.



Con respecto al percentil 10 de la Función de Distribución Acumulativa, se observa que este valor aumenta en aproximadamente 50 dB junto con el radio de la celda para las técnicas SFR y FFR1.5. Como se observa en la Ecuación (3.1), la SINR es el cociente entre la señal deseada y la suma de las señales interferentes y el ruido, el aumento en su valor se justifica en un incremento en el numerador o un decremento en el denominador, pero conforme aumenta el radio, las pérdidas de propagación crecen por lo que la potencia de la señal deseada no aumenta, el ruido se modela de la misma manera y es una variable aleatoria e independiente, para que el denominador decrezca se requiere que las señales interferentes percibidas tengan valores menores.

$$SINR = \frac{P_{Rx}}{P_I + P_N} \quad (3.1)$$

Donde,

SINR Relación Señal a Interferencia más Ruido percibida por el UE elegido en eNodeB específico. Adimensional.

P_{Rx} Potencia de Recepción del UE elegido, medida en Watts.

P_I Potencia Interferente percibida por el UE elegido de los eNodeB vecinos, medida en Watts.

P_N Potencia de Ruido Térmico del sistema, medida en Watts.

Las técnicas SFR y FFR1.5 diferencian los bordes de la celda con el fin de utilizar en esta área frecuencias distintas a las empleadas por sus vecinas, en el centro de la celda se utilizan rangos de frecuencia comunes en todas las celdas del sistema, al incrementar el radio de la celda, las áreas que comparten asignación de frecuencias se van distanciando cada vez más unas de otras, disminuyendo así la interferencia inter-celda que se percibe.

Con el aumento del radio los valores de SINR obtenidos por la técnica UFR disminuyen, mientras que con las técnicas SFR y FFR1.5 aumentan. El valor del Percentil 10 de la SINR para UFR con un radio de 100 m es de 2 dB y con 5000 m es de -33 dB, esto se debe a que esta técnica no asigna mayor potencia a los usuarios que se encuentran más alejados del eNodeB, es decir, que las señales percibidas por estos usuarios son más débiles. La diferencia de la distancia entre el eNodeB de su celda y el de la celda adyacente se vuelve despreciable al incrementar el radio, por lo que la intensidad de la señal deseada y las interferentes son similares, de ahí que la SINR de UFR tenga una relación inversamente proporcional con el radio de la celda.



Con los valores de SINR de los sistemas que usan las técnicas SFR y FFR1.5 se espera que todos sus usuarios operen con esquemas de modulación de mayor orden y por consiguiente los resultados en cuanto a *throughput* sean más cercanos al valor teórico, sin embargo en la simulación estos valores no son alcanzados, ya que estas técnicas mitigan más no eliminan la interferencia inter-celda y siguen presentando desvanecimiento lento y pérdidas de propagación en el sistema.

Las técnicas SFR y FFR1.5 ofrecen mitigar la interferencia inter-celda, pero a cambio se limitan los recursos dentro de las celdas, por lo cual estas técnicas dependen de la distribución de los usuarios y del radio de la celda, sin embargo el aumento de la SINR producto de la mitigación de la interferencia inter-celda, permite obtener en algunos casos, valores de *throughput* del sistema más elevados que los de UFR.

En cuanto a la capacidad de brindar servicio a los usuarios, la técnica más eficiente en este escenario es FFR1.5 que atiende al mayor número de usuarios en la mayoría de los casos, esto ratifica su ventaja frente a las demás técnicas gracias a su precisa delimitación de las áreas dentro de la celda, que permite: mitigar la interferencia inter-celda, aumentar los valores de SINR e incrementar el número de usuarios que superan el valor de la SINR objetivo.

3.2.2. Análisis del *Throughput* del Sistema

Las Figura 3. 2, Figura 3. 3 y Figura 3. 4 muestran el *throughput* alcanzado en el sistema con las técnicas UFR, SFR y FFR1.5 respectivamente. Los resultados corresponden a un radio de celda de 100 m y 8 usuarios por sector.

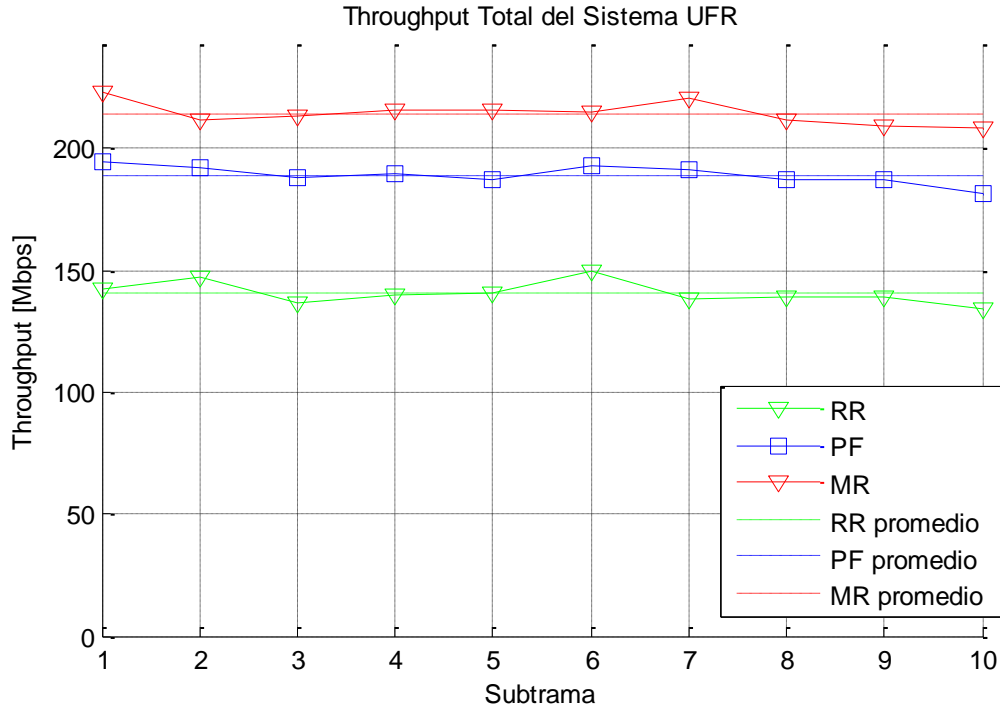


Figura 3. 2. Throughput UFR Caso 1 - Escenario 1.

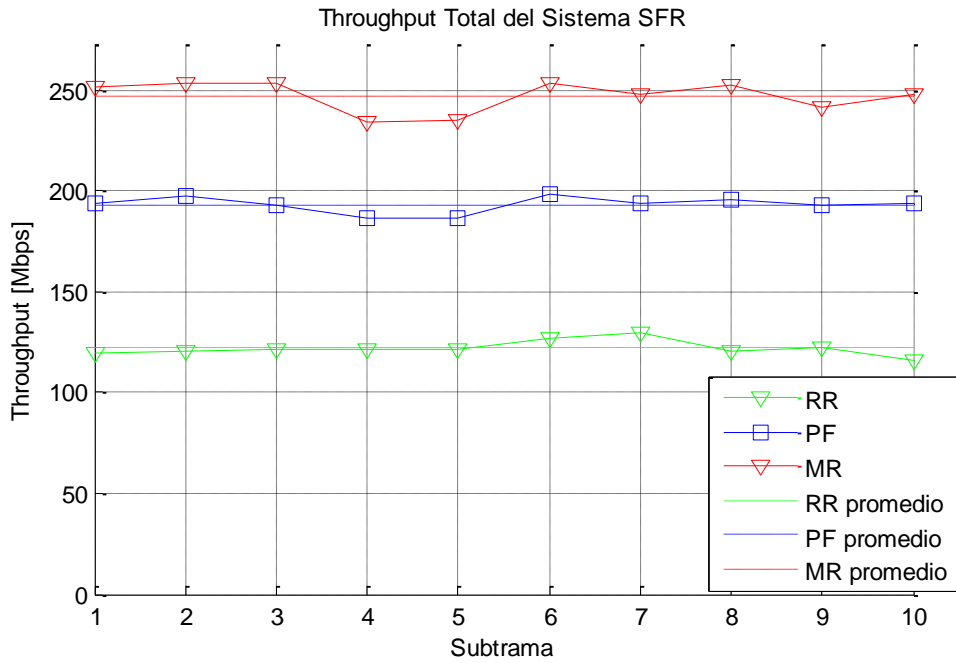


Figura 3. 3. Throughput SFR Caso 1 - Escenario 1.

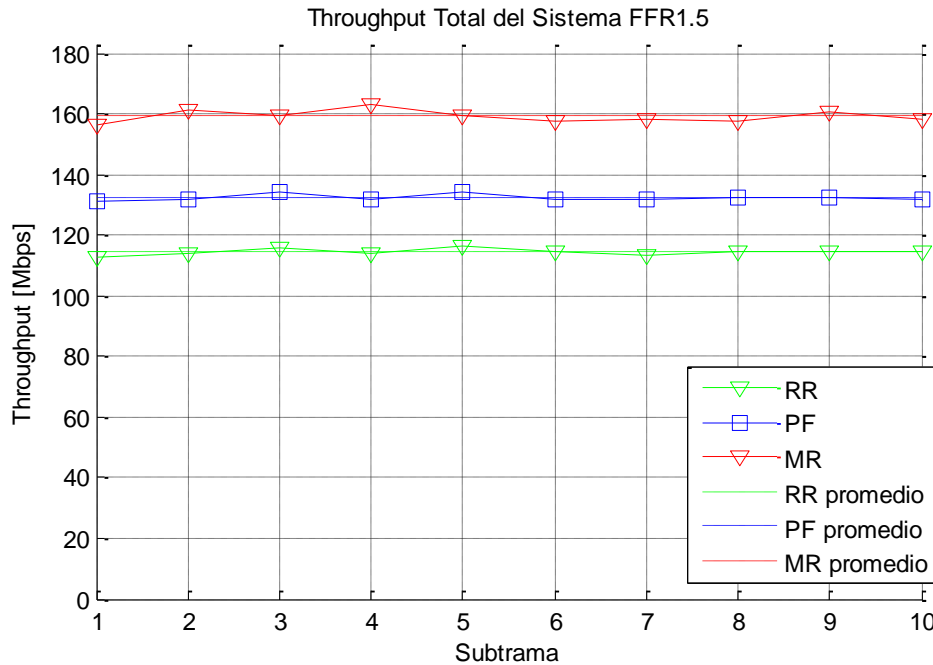


Figura 3. 4. Throughput FFR1.5 - Escenario1.

En las figuras anteriores, se evidencia que los sistemas LTE con las técnicas SFR y FFR1.5, obtienen en la mayoría de los casos valores superiores de *throughput* en relación con el sistema con UFR. Esto se evidencia en la técnica SFR que supera en 40 y 20 Mbps los resultados de *throughput* de UFR al emplear los planificadores PF y MR, como se observa en la Figura 3. 3, además al usar la técnica FFR1.5 el aumento de los valores de *throughput* con respecto a UFR es de 30, 25 y 50 Mbps para los planificadores MR, PF y RR respectivamente, como se muestra en la Figura 3. 3.

El sistema con la técnica SFR y el planificador RR presenta un valor de *throughput* 10 Mbps por debajo del obtenido por UFR, como se muestra en la Figura 3. 3, esto se debe a que SFR al definir 2 áreas al interior de la celda (centro y borde) es susceptible a la distribución desproporcionada de los usuarios dentro de las mismas, además de que la asignación de los recursos se realiza de forma independiente en estas 2 áreas, por lo que al emplear el planificador RR se presenta en dos ocasiones una subutilización de los recursos, ya que RR divide los PRB disponibles por el número total de usuarios y toma la parte entera inferior de dicho cociente, dejando PRB sin asignar.

El hecho de realizar la asignación de recursos con los planificadores de forma independiente en cada una de las áreas definidas por las técnicas SFR y FFR1.5, representa una desventaja al momento de emplear el planificador RR, afectando el desempeño del sistema por el efecto de la subutilización, en el caso de los planificadores PF y MR no es relevante.



Con un ancho de banda de 20 MHz se tienen 100 bloques de recursos disponibles, la velocidad máxima teórica de transmisión que se puede alcanzar sin MIMO es de 100.8 Mbps por celda, es decir 403.2 Mbps en el sistema. Los valores de *throughput* del sistema obtenidos en las simulaciones del escenario 1 están por debajo del valor teórico y se encuentran en la Tabla 3. 3, los resultados de estas simulaciones se encuentran en el Anexo B.

Tabla 3. 3. Resultados de Throughput para el Escenario 1.

RESULTADOS		CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
		100 m	250 m	500 m	1000 m	5000 m
		8 UE	15 UE	20 UE	30 UE	33 UE
UFR	MR [Mbps]	210	240	240	230	120
	PF [Mbps]	190	200	180	80	10
	RR [Mbps]	140	140	80	60	10
SFR	MR [Mbps]	250	250	220	165	20
	PF [Mbps]	195	195	155	80	8
	RR [Mbps]	120	130	105	35	5
FFR1.5	MR [Mbps]	160	230	205	140	68
	PF [Mbps]	130	200	160	105	58
	RR [Mbps]	115	150	140	90	39

En la Tabla 3. 3 se muestran 5 casos analizados para las técnicas UFR, SFR y FFR1.5, cada uno varía en el radio de la celda y en el número de usuarios por sector, los valores seleccionados se especifican a continuación.

- **Caso 1:** Radio 100m, usuarios por sector 8.
- **Caso 2:** Radio 250m, usuarios por sector 15.
- **Caso 3:** Radio 500m, usuarios por sector 20.
- **Caso 4:** Radio 1000m, usuarios por sector 30.
- **Caso 5:** Radio 5000m, usuarios por sector 33.



3.2.2.1. Técnicas de Reúso de Frecuencia y el Planificador *Maximum Rate*

De acuerdo a los resultados de la Tabla 3. 3, para radios menores a 500 m la técnica SFR supera hasta en 40 Mbps los valores de *throughput* alcanzados por UFR. Las técnicas SFR y UFR tienen igual cantidad de recursos dentro de la celda, pero SFR logra alcanzar valores de *throughput* más elevados, ya que sus usuarios perciben mejores condiciones del canal y emplean esquemas de modulación avanzados (16 y 64 QAM), lo que implica la transmisión de más información por bit, por esto la velocidad del sistema aumenta, demostrando que SFR consigue mitigar la interferencia inter-celda, puesto que la disminución de la interferencia inter-celda percibida es lo que permite aumentar la SINR, mejorar las condiciones percibidas por los usuarios y por tanto transmitir a una mayor velocidad.

Para radios superiores a 500 m la técnica UFR al no tener restricciones para la utilización de los recursos disponibles, obtiene los valores de *throughput* más elevados, además al emplear el planificador MR asigna los recursos a los usuarios más cercanos al eNodeB. Por otra parte las técnicas SFR y FFR1.5 realizan una asignación de los porcentajes de radio y potencia del borde de la celda, esta asignación permanece constante a lo largo de este escenario, conforme aumenta el radio y el número de usuarios por sector, se genera un desequilibrio en la distribución de los usuarios al interior de las áreas definidas en la celda, provocando una disminución en la capacidad del sistema.

La técnica FFR1.5 obtiene valores de *throughput* hasta 90 Mbps por debajo de SFR y UFR, debido a que en la búsqueda de mitigar la interferencia inter-celda, no asigna una sexta parte de los recursos disponibles en las celdas del sistema que funciona como una banda de guarda (ver Sección 1.9.5.2); lo que hace que no obtenga buenos resultados con el planificador MR, el cual busca aprovechar al máximo los recursos disponibles.

3.2.2.2. Técnicas de Reúso de Frecuencia y los Planificadores *Proportional Fair* y *Round Robin*

Para radios superiores a 500 m la técnica FFR1.5 obtiene los mejores resultados con el planificador PF y para radios superiores a 100 m con el planificador RR. FFR1.5 delimita 3 áreas al interior de la celda, logrando una eficiente asignación de los recursos, por lo que supera los valores de *throughput* alcanzados por la técnica SFR, además supera a UFR debido a la diferenciación de la posición de los usuarios con lo que mitiga la interferencia inter-celda, como en el caso del radio igual a 5000 m donde supera hasta en 50 y 34 Mbps los valores de *throughput* obtenidos en el sistema con las técnicas UFR y SFR.



3.3. ESCENARIO 2

El objetivo de este escenario es mejorar los resultados obtenidos por las técnicas SFR y FFR1.5 de los casos 2 a 5 del escenario 1, mediante la variación de los porcentajes de potencia y radio del borde de la celda.

El caso del radio igual a 100 m, no es tomado en consideración debido a que los porcentajes de radio y potencia del borde de la celda asignados anteriormente permiten maximizar los resultados de *throughput* y SINR del sistema obtenidos. Los parámetros fijos de este escenario se muestran en la Tabla 3. 4.

Tabla 3. 2. Parámetros Fijos Escenario 2.

Parámetro	Valor
Tipo de Antena	Katherein 742215
Desvanecimiento	Lento
Modelo de Propagación	COST 231 Micro Urbano
Frecuencia	1710 MHz
Potencia Tx	40 W
Ancho de Banda	20 MHz
Planificadores	RR,PF,MR
SINR Objetivo	8,1 dB
Número de Celdas	4

En la Tabla 3. 5 se muestran las configuraciones de los porcentajes de radio y potencia del borde de la celda, con estos porcentajes el sistema alcanza valores máximos de *throughput* para las técnicas SFR y FFR1.5 con al menos dos de los tres planificadores.

Tabla 3. 3. Variaciones del Escenario 2.

Porcentajes Borde [%]		Caso 2 250 m 15 UE	Caso 3 500 m 20 UE	Caso 4 1000 m 30 UE	Caso 5 5000 m 33 UE
SFR	Radio [%]	35	50	65	80
	Potencia [%]	30	35	35	40
FFR1.5	Radio Externo [%]	20	25	25	20
	Radio Interno [%]	50	55	60	70
	Potencia [%]	25	25	25	30

En la Figura 3. 5 se observan las variaciones de los porcentajes de radio del borde de la celda para los diferentes casos. Se plantea que el porcentaje del radio del borde se incremente a medida que el radio de la celda aumenta para las técnicas

SFR y FFR1.5, esto se debe a que el centro de la celda es la región con mayor número de recursos, para aumentar el *throughput* se tiende a disminuir el área de esta región, que conlleva a aumentar los recursos para una menor cantidad de usuarios (que tienen mejores condiciones del canal) y así aumentar las velocidades del sistema. El porcentaje de la potencia asignada al borde se eleva para compensar el incremento de las pérdidas conforme crece el radio de la celda.

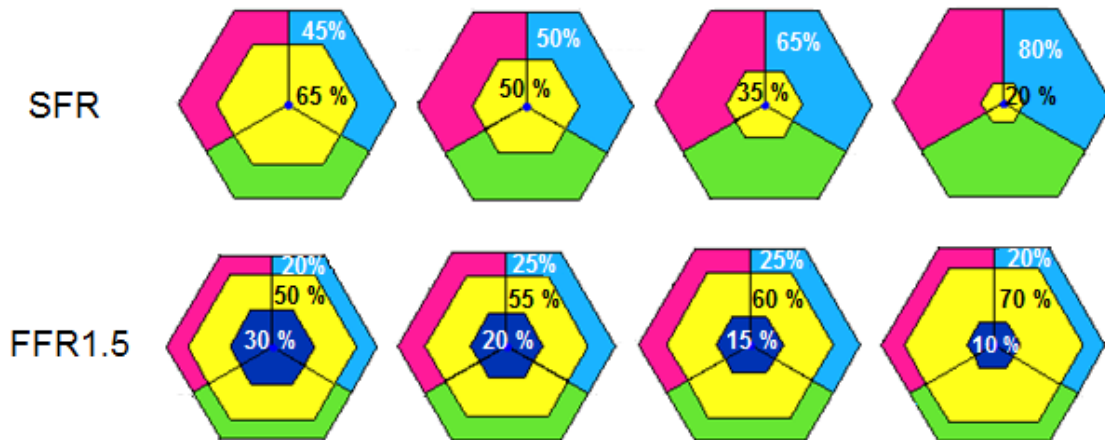


Figura 3. 5. Variaciones del Porcentaje del Radio del Borde de la Celda para el Escenario 2.

3.3.1. Análisis de la SINR del Sistema y Número de Usuarios Atendidos

En la Tabla 3. 6 se muestran los resultados de la Función de Distribución Acumulativa de la SINR del sistema y el porcentaje de usuarios atendidos para el escenario 2, estos resultados se encuentran en el Anexo B.



Tabla 3. 6. Resultados SINR Escenario 2.

Caso	Técnica	SINR		Porcentaje de Usuarios Atendidos [%]
		Objetivo [%]	Percentil10 [dB]	
2 250 m 15 UE	UFR	70	0	64
	SFR	100	53	56.2
	FFR1.5	100	56	49.1
3 500 m 20 UE	UFR	60	0	59.2
	SFR	100	64	46.7
	FFR1.5	100	65	36
4 1000 m 30 UE	UFR	30	- 8	27.7
	SFR	100	73	25.3
	FFR1.5	100	77	24.5
5 5000 m 33 UE	UFR	1	- 33	1.7
	SFR	100	90.5	20.7
	FFR1.5	100	93	14.8

De acuerdo a los resultados de la Tabla 3. 6, los valores del percentil 10 de la Función de Distribución Acumulativa de la SINR del sistema obtenidos por las técnicas SFR y FFR1.5, superan en la mayoría de los casos los valores obtenidos por estas 2 técnicas en el escenario 1. El aumento del percentil 10 en las técnicas SFR y FFR1.5 muestra que la variación adecuada de los porcentajes de radio y potencia del borde de la celda, ayudan a mitigar la interferencia inter-celda y por tanto a aumentar los valores de SINR de sus usuarios.

El porcentaje de usuarios atendidos con el planificador MR decrece conforme aumenta el radio ya que las pérdidas se incrementan provocando una disminución en el número de usuarios con buenas condiciones del canal.

Para radios menores a 5000 m, la técnica UFR obtiene los mayores porcentajes de usuarios atendidos y la técnica FFR1.5 los menores. Estos resultados muestran que las técnicas SFR y FFR1.5 con el fin de obtener valores de *throughput* más cercanos a los de UFR, hacen un sacrificio en el número de usuarios atendidos.



3.3.2. Análisis del *Throughput* del Sistema.

En la Tabla 3. 7 se muestran los resultados de *throughput* del sistema obtenidos con las variaciones planteadas en el escenario 2, estos resultados se encuentran en el Anexo B.

Las variaciones en la configuración de los porcentajes del borde de la celda, permiten que las técnicas SFR y FFR1.5 en la mayoría de los casos, superen o igualen los resultados obtenidos por UFR al emplear los planificadores RR y PF.

Tabla 3. 7. Resultados de *Throughput* Escenario 2.

Caso	Técnica	<i>Throughput</i> [Mbps]		
		MR	PF	RR
2 250 m 15 UE	UFR	240	200	140
	SFR	260	200	120
	FFR1.5	230	215	165
3 500 m 20 UE	UFR	240	180	80
	SFR	250	180	80
	FFR1.5	220	180	130
4 1000 m 30 UE	UFR	230	80	60
	SFR	210	120	70
	FFR1.5	165	130	110
5 5000 m 33 UE	UFR	120	10	10
	SFR	60	45	25
	FFR1.5	82	80	70

De acuerdo a la Tabla 3. 7 en la mayoría de los casos, los valores de *throughput* alcanzados por las técnicas SFR y FFR1.5 superan los valores obtenidos en el escenario 1. A continuación se realiza un análisis del *throughput* del sistema alcanzado por las técnicas de reúso de frecuencia con cada uno de los planificadores.



3.3.2.1. Técnicas de Reúso de Frecuencia y el Planificador *Maximum Rate*

La variación de los porcentajes del borde de la celda le permite a la técnica SFR superar el valor de *throughput* obtenido por UFR en 10 Mbps para un radio de 500 m. Aunque se obtiene una mejora con respecto al escenario anterior, la técnica UFR continua obteniendo los mejores resultados para radios superiores a 1000 m, como se evidencia en el caso de radio de celda de 5000 m que supera en 60 Mbps los resultados de SFR, con lo cual se concluye que UFR es la más apropiada para radios mayores a 1 Km con el planificador MR.

La técnica FFR1.5 para radios menores a 1000 m, obtiene valores de *throughput* más cercanos a los obtenidos por UFR en comparación con el escenario anterior. Aunque se consiguen mejores resultados gracias a las variaciones de los porcentajes de los bordes de la celda, el desempeño de esta técnica con el planificador MR no alcanza los mejores resultados.

3.3.2.2. Técnicas de Reúso de Frecuencia y el Planificador *Proportional Fair*

Como se observa en la Tabla 3. 7, los valores de *throughput* del sistema obtenidos por la técnica UFR se encuentran incluso 70 Mbps por debajo de los valores alcanzados por las técnicas SFR y FFR1.5 que obtienen hasta 215 Mbps, esto se debe a que estas dos técnicas mitigan la interferencia inter-celda percibida por los usuarios del sistema, justificado en el aumento de la SINR (ver Sección 3.3.1), por lo cual los recursos asignados a sus usuarios son utilizados con esquemas de codificación y modulación de alto orden, logrando velocidades superiores.

FFR1.5 es la técnica que mejores resultados obtiene con el planificador PF, debido a que realiza una distribución justa de los recursos disponibles entre los usuarios de las celdas del sistema y como resultado mitiga la interferencia inter-celda. En el caso del radio de la celda igual a 5000 m, se observa con mayor claridad la superioridad de FFR1.5 con este planificador, ya que obtiene valores de *throughput* 35 Mbps por encima de SFR. Para celdas con radios menores a 5000 m, los resultados de las técnicas SFR y FFR1.5 son similares, con una diferencia máxima de 15 Mbps, gracias a que ambas técnicas mitigan la interferencia inter-celda que perciben los usuarios del borde de la celda, al asignar mayor potencia y rangos de frecuencia diferentes a los de las celdas vecinas a esta área.

3.3.2.3. Técnicas de Reúso de Frecuencia y el Planificador *Round Robin*

Como se evidencia en la Tabla 3. 6, la técnica UFR supera en 20 Mbps el valor de *throughput* obtenido por SFR para un radio de la celda de 250 m, a partir del radio



de 500 m, la técnica SFR alcanza valores de *throughput* hasta en 40 Mbps mayores, esto se debe a que conforme aumenta el radio, las pérdidas y la interferencia inter-celda crecen debido a que incrementa el número de celdas que comparten la misma asignación de frecuencias, la técnica SFR a diferencia de UFR, logra mitigar la interferencia inter-celda, lo que se evidencia en la mejora de los resultados de la SINR y permite tener mejores resultados con el incremento del radio de la celda.

La técnica FFR1.5 obtiene en todos los casos los valores de *throughput* más elevados, debido a que sus usuarios tienen buenas condiciones del canal y están distribuidos de forma equilibrada entre las áreas definidas al interior de la celda, lo que le permite obtener los mejores resultados al emplear el planificador RR con valores de hasta 60 Mbps por encima de los resultados de SFR y UFR, ya que este no tiene en cuenta el estado del canal que perciben los usuarios y realiza una asignación imparcial de los recursos. Se concluye que FFR1.5 realiza una distribución de los recursos más justa y por consiguiente mitiga la interferencia inter-celda.

3.4. ESCENARIO 3

El objetivo de este escenario es estudiar la capacidad de las técnicas de reúso de frecuencia de mitigar la interferencia inter-celda del sistema, mediante la variación del número de celdas que lo conforman y obtener velocidades de transmisión semejantes entre sí.

En la Tabla 3. 8 se muestra los parámetros configurados como fijos para el escenario 3. Esta configuración busca que las condiciones percibidas por las celdas de los diferentes sistemas (UFR, SFR y FFR1.5) sean similares, aunque el ruido y el desvanecimiento son variables aleatorias, el factor más relevante en las diferencias de los resultados de las celdas es el valor de interferencia inter-celda.

Tabla 3. 4. Configuración Escenario 3.

Parámetro	Valor
Tipo de Antena	Katherein 742215
Desvanecimiento	Lento
Modelo de Propagación	COST 231 Micro Urbano
Frecuencia	1710 MHz
Potencia Tx	40 W
Ancho de Banda	20 MHz
Planificadores	PF
SINR Objetivo	8,1 dB
Radio de la Celda	500 m
Usuarios por Sector	20



SFR	Porcentaje Radio Borde	50 %
	Porcentaje Potencia Borde	35 %
FFR1.5	Porcentaje Radio Borde Externo	25 %
	Porcentaje Radio Borde Interno	55 %
	Porcentaje Potencia Borde	25 %

En este caso de estudio se selecciona el planificador PF, ya que tiene en cuenta las condiciones del canal en la asignación de los recursos y garantiza servicio a todos los usuarios. Se toma la configuración con un radio de 500 m y 20 usuarios por sector debido a que son valores intermedios de los casos planteados a lo largo de este capítulo.

La variación del número de celdas permite aumentar la interferencia inter-celda. En la Figura 3. 6, se muestran las diferentes configuraciones cuando se varía el número de celdas entre: 4, 7 y 9. Los colores verde, amarillo y azul representan las celdas que comparten la misma asignación de frecuencias.

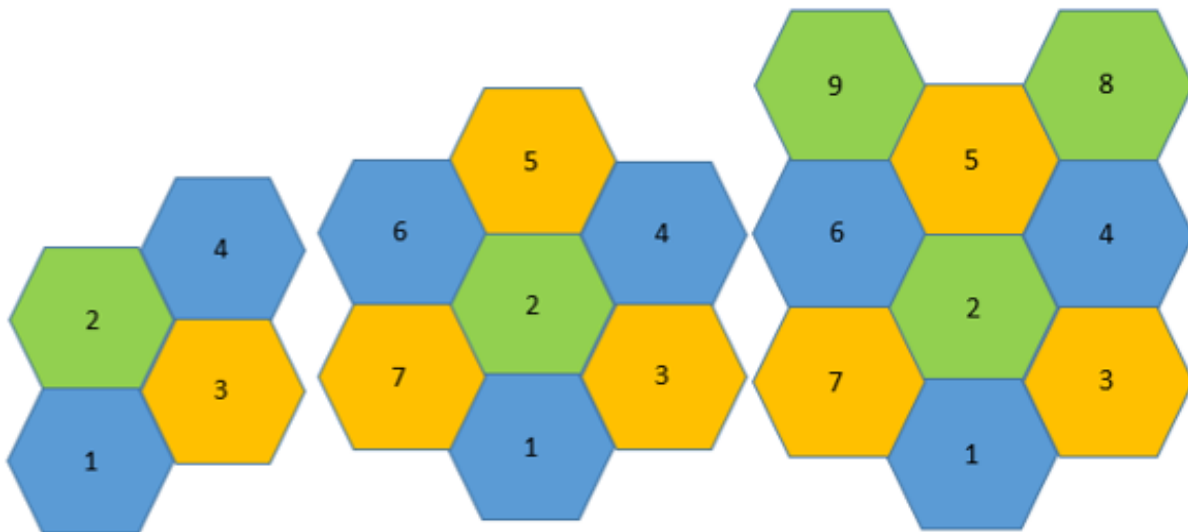


Figura 3. 6. Distribución Celdas del Sistema.

3.4.1. Sistema con Cuatro Celdas

En las Figura 3. 7, Figura 3. 8 y Figura 3. 9 se muestra el *throughput* obtenido por las 4 celdas con el planificador PF, para las técnicas UFR, SFR y FFR1.5.

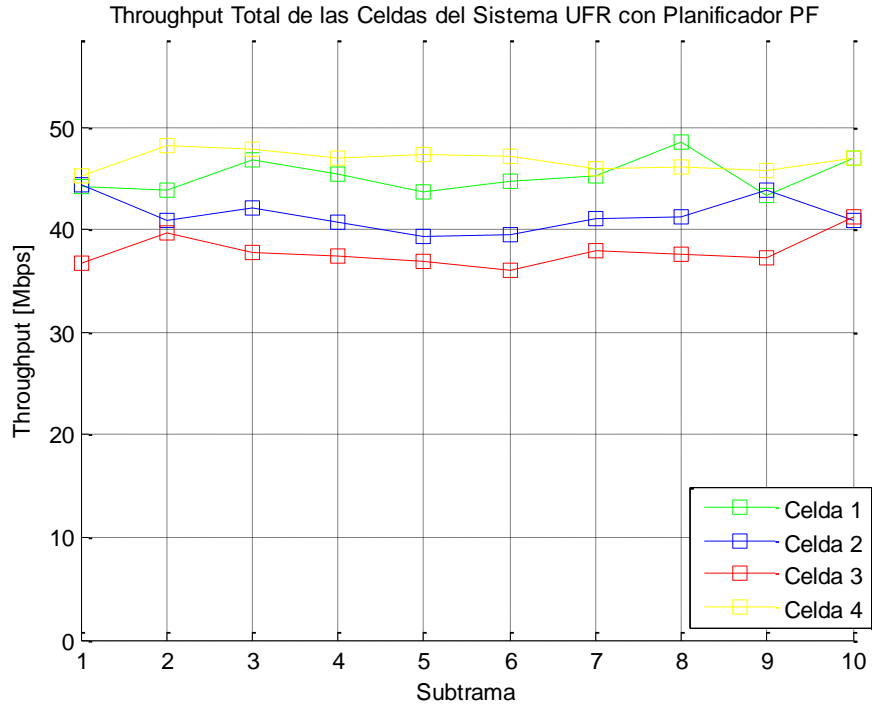


Figura 3. 7. Throughput con UFR-Sistema de 4 Celdas.

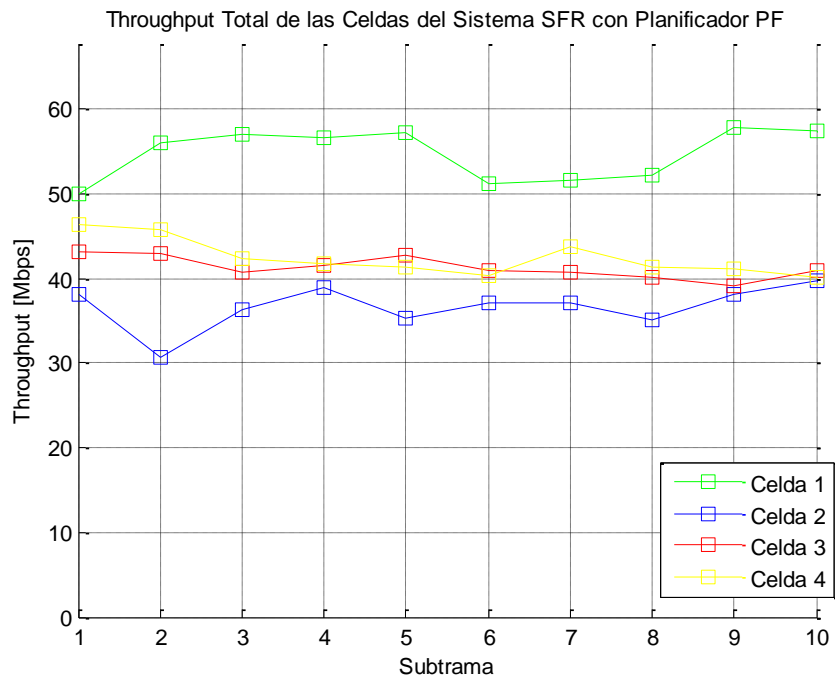


Figura 3. 8. Throughput con SFR- Sistema de 4 celdas.

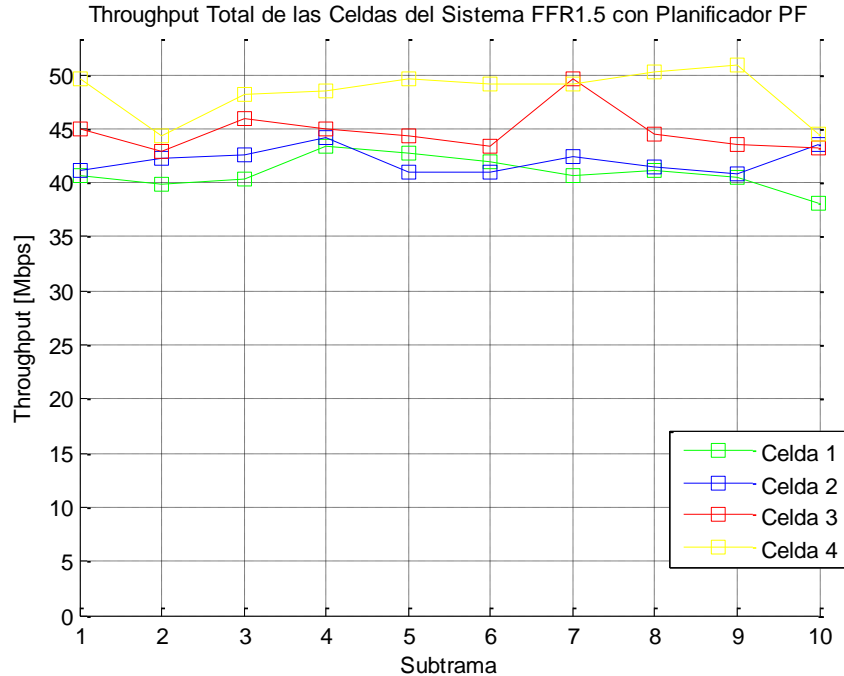


Figura 3. 9. Throughput con FFR1.5- Sistema de 4 celdas.

El sistema con la técnica UFR no busca mitigar la interferencia inter-celda, pero los resultados de *throughput* obtenidos tienen una diferencia máxima de 10 Mbps entre los valores alcanzados por cada una de las celdas, con lo cual se evidencia que las celdas de este sistema perciben niveles de interferencia inter-celda similares, ya que para alcanzar velocidades cercanas las celdas del sistema deben experimentar condiciones semejantes entre las que se destaca los niveles de interferencia inter-celda.

Al emplear la técnica SFR los valores de *throughput* alcanzados por las celdas del sistema se encuentran dentro de un rango de valores más amplio desde 30 Mbps a 60 Mbps, en comparación con los resultados obtenidos al emplear las técnicas FFR1.5 y UFR. Estos resultados muestran que SFR no mitiga de manera uniforme la interferencia inter-celda y por lo tanto no ofrece altas velocidades a todas las celdas del sistema.

Las tres técnicas alcanzan un valor promedio de *throughput* del sistema de 180 Mbps, a pesar de que SFR es la técnica con mayor dispersión, alcanza los mismos resultados de FFR1.5 y UFR a nivel de sistema.

3.4.2. Sistema con Siete Celdas

En las Figura 3. 10, Figura 3. 11 y Figura 3. 12 se muestra el *throughput* obtenido por las 7 celdas con el planificador PF, para las técnicas UFR, SFR y FFR1.5.

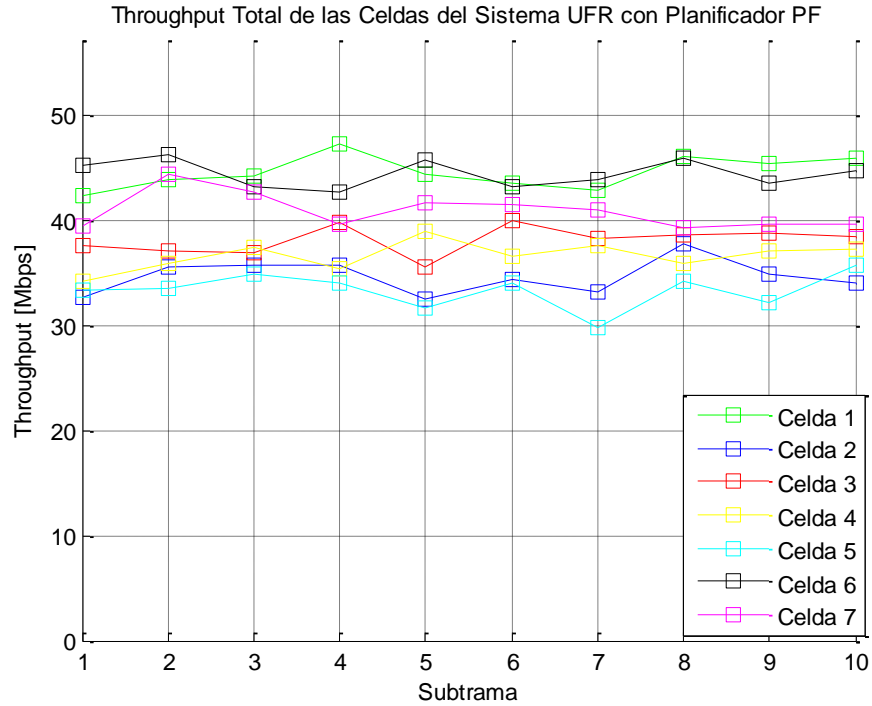


Figura 3. 10. Throughput con UFR- Sistema de 7 Celdas.

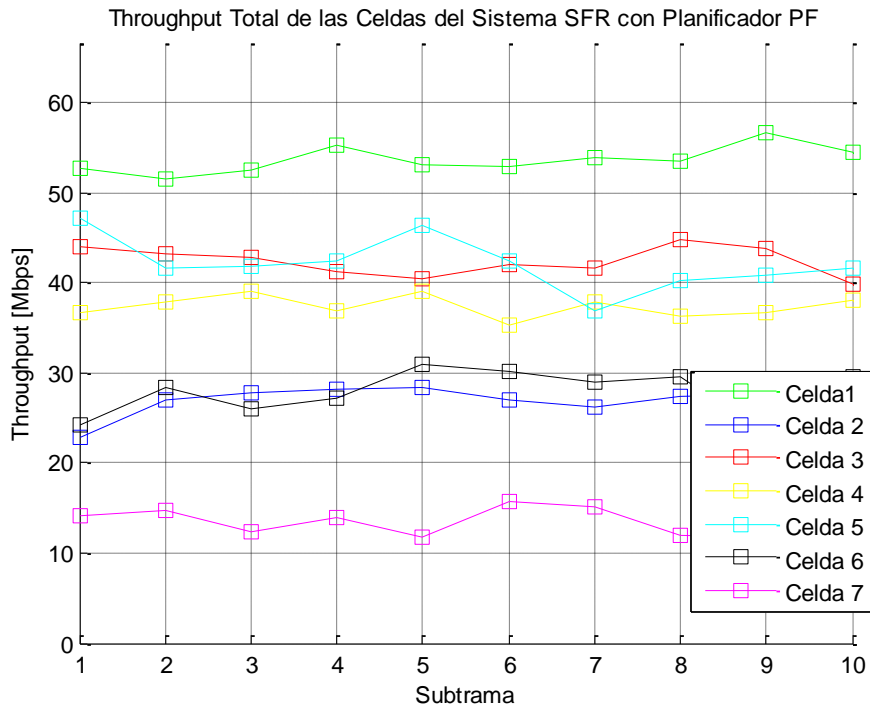


Figura 3. 11. Throughput con SFR- Sistema de 7 Celdas.

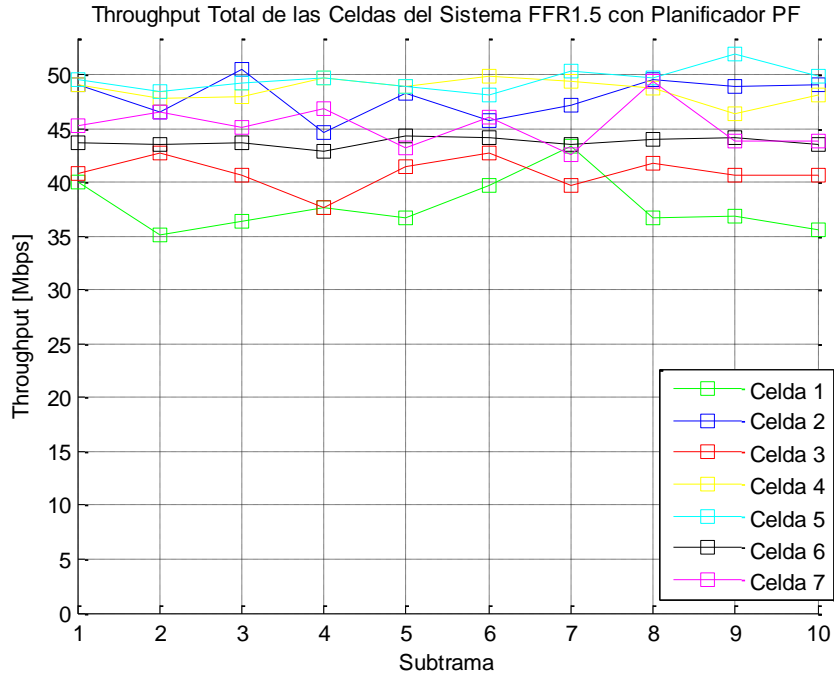


Figura 3. 12. Throughput con FFR1.5- Sistema de 7 Celdas.

En este sistema el número de celdas que comparte la misma asignación de frecuencias incrementa, lo que provoca un aumento en la interferencia inter-celda, esto se refleja en una mayor dispersión de los resultados de *throughput* obtenidos por las tres técnicas de hasta 40 Mbps y se evidencia que conforme aumenta la interferencia inter-celda, las celdas del sistema no alcanzan velocidades similares.

Corroborando los resultados obtenidos con el sistema de cuatro celdas, la técnica SFR obtiene la mayor dispersión y los valores más altos de *throughput* alcanzados por las celdas (58 Mbps), ya que esta técnica al buscar mitigar la interferencia inter-celda sin desperdiciar los recursos disponibles, genera mayor variación en los niveles de interferencia que puede percibir o generar una celda con sus vecinas.

3.4.2. Sistema con Nueve Celdas

Los resultados obtenidos para el *throughput* del sistema de 9 celdas con las técnicas UFR, SFR y FFR1.5 se muestran en las Figura 3. 13, Figura 3. 14 y Figura 3. 15.

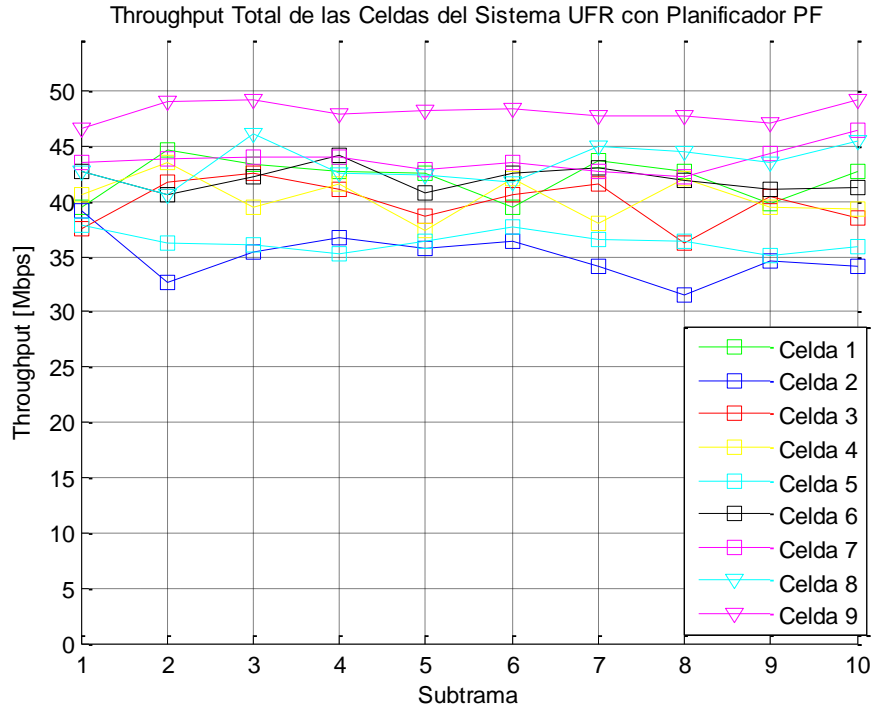


Figura 3. 13. Throughput con UFR- Sistema de 9 Celdas.

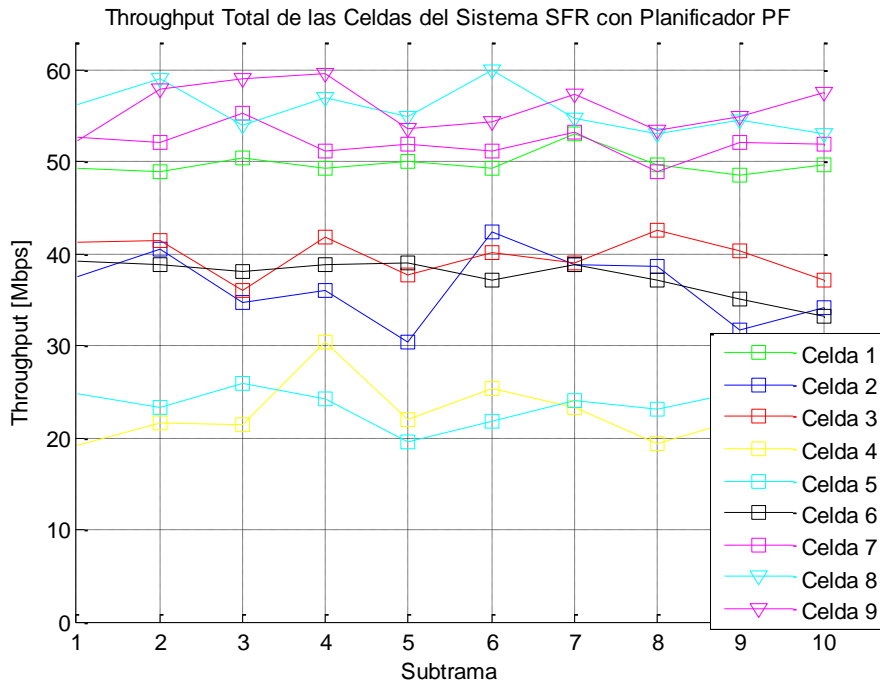


Figura 3. 14. Throughput con SFR- Sistema de 9 Celdas.

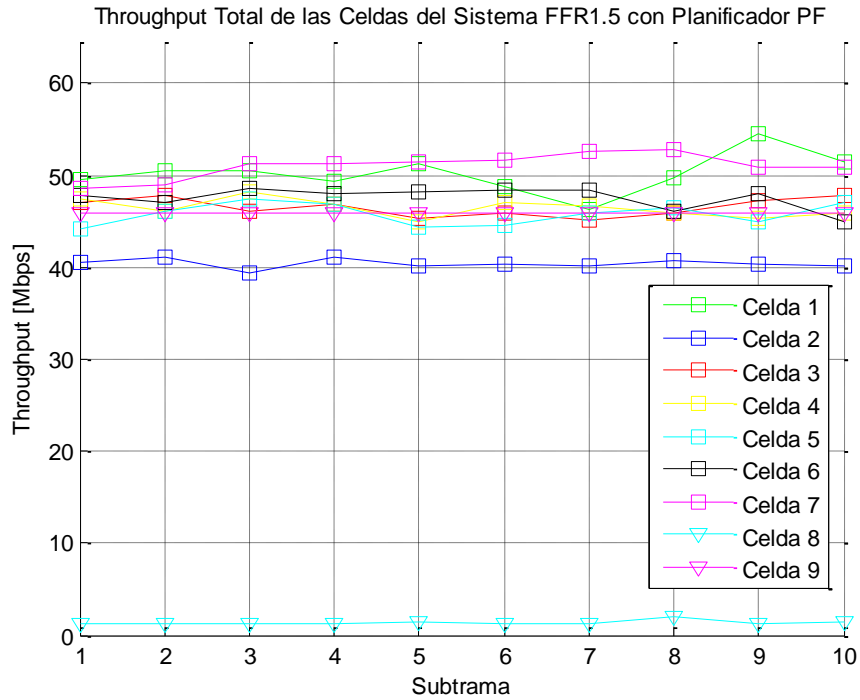


Figura 3. 15. Throughput con FFR1.5- Sistema de 9 Celdas.

En el sistema con nueve celdas, la técnica UFR obtiene los mejores resultados en cuanto a niveles de *throughput*, en un rango de 30 Mbps a 50 Mbps, esto se debe a que no busca mitigar la interferencia inter-celda y las celdas del sistema utilizan la totalidad de los recursos disponibles sin ninguna restricción, lo que les permite percibir niveles de interferencia inter-celda semejantes.

La técnica SFR continua obteniendo resultados de *throughput* dispersos con una diferencia aproximada de 40 Mbps entre las celdas, lo cual muestra que esta técnica no mitiga de manera uniforme la interferencia inter-celda. Las variaciones en los resultados demuestran que SFR tiene fallas en la asignación de los recursos de las áreas definidas dentro de las celdas del sistema, ya que en la búsqueda de no sacrificar los recursos disponibles genera inestabilidad en las velocidades que pueden alcanzar sus celdas.

Al analizar el efecto del aumento de la interferencia inter-celda en el sistema de 9 celdas con la técnica FFR1.5, se observa un cambio en los resultados obtenidos anteriormente en este escenario, ya que en este sistema la celda 8 obtiene un valor de *throughput* hasta de 48 Mbps por debajo de las demás celdas, esto se debe a que entre esta celda y la 9 que comparten la misma asignación de frecuencia, no existe otra celda que permita mitigar la interferencia inter-celda generada entre ellas. Se concluye que la técnica FFR1.5 obtiene resultados sobresalientes al mitigar de forma homogénea la interferencia inter-celda, pero es susceptible al diseño u organización de las celdas del sistema.



CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado se expone el diseño, implementación y análisis de un módulo de técnicas de reúso de frecuencia integradas al simulador básico a nivel de sistema para LTE como tercera versión, capaz de aplicar las técnicas SFR y FFR1.5 a escenarios con diferentes características y de realizar cálculos de capacidad que permiten evidenciar el aporte de estas técnicas a la tecnología LTE. Con la intención de evaluar el comportamiento de los algoritmos de reúso de frecuencia al simulador, se plantean tres casos de estudio donde se varían las técnicas de reúso de frecuencia, el radio de la celda, el número de usuarios por sector, los porcentajes de radio y potencia del borde de la celda y el número de celdas que componen el sistema en estudio. En este capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos futuros del trabajo de grado *Algoritmo de Reúso de Frecuencia para el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE*.

4.1 CONCLUSIONES

En cuanto al diseño y desarrollo del algoritmo de reúso de frecuencia integrado en el simulador básico a nivel de sistema para LTE se concluye:

- La tercera versión del simulador básico a nivel de sistema para LTE con técnicas de reúso de frecuencia integradas representa una herramienta de apoyo académico, que puede emplearse para los procesos de enseñanza y aprendizaje de la tecnología LTE y en específico de las técnicas de reúso de frecuencia que son escasamente implementadas en otros simuladores, además de garantizar una interfaz gráfica amigable y la documentación pertinente para su uso.
- En el proceso de diseño y desarrollo del simulador básico a nivel de sistema para LTE con técnicas de reúso de frecuencia, se presentaron diversas dificultades como: la visualización del escenario de estudio y de la asignación de PRB con varios usuarios, los tiempos de simulación, el almacenamiento en diferentes vectores para los usuarios que se encuentran en el borde y en el centro de la celda, y la correcta integración de las técnicas de reúso de frecuencia con los planificadores de recursos. También fue necesario realizar una capacitación de las dos versiones anteriores del simulador y de la herramienta software Matlab®. La herramienta *software* de simulación Matlab es muy completa y cuenta con gran cantidad de información en internet, gracias a lo cual se logran despejar dudas y encontrar formas de solucionar



los problemas presentes en el desarrollo. Además cuenta con la opción de generar una versión ejecutable del simulador para no depender de versiones compatibles con la versión de Matlab2013a.

- La metodología de desarrollo *software* RUP que se utilizó para la creación de la tercera versión del simulador, permitió realizar múltiples ciclos de desarrollo que una vez finalizados fueron evaluados como un producto terminado, esto permitió una retroalimentación crucial para la obtención de la versión final del simulador.

A partir de los casos de estudio que se plantearon en este trabajo de grado para evaluar la capacidad del sistema con técnicas de reúso de frecuencia se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Del escenario 1 en el cuál se variaron el radio de la celda y el número de usuarios por sector en un sistema de cuatro celdas, se puede concluir que el uso de técnicas de coordinación de interferencia permite incrementar los valores de *Throughput* del sistema para celdas con radios pequeños (menores a 1 Km), esta conclusión aplica para las técnicas SFR y FFR1.5. Se observa además que para las celdas con mayor radio y mayor número de usuarios por sector, los valores de *Throughput* no presentan mejoras con respecto la técnica UFR. De lo anterior se rescata la importancia de implementar celdas de radio pequeño para la tecnología LTE, ya que con técnicas de coordinación de interferencia se mejora la calidad de servicio percibida por el usuario final.
- La técnica UFR es la más eficiente cuando se emplea el planificador MR, debido a que tiene un reúso de frecuencia igual a 1 y no tiene áreas delimitadas al interior de la celda. Aunque SFR logra superar los valores de *Throughput* alcanzados por UFR para radios menores a 1000 m, realiza un sacrificio en el número de usuarios atendidos.
- La técnica FFR1.5 es la más eficiente cuando se emplean los planificadores PF y RR, aunque SFR también logra buenos resultados con estos planificadores, están por debajo de los obtenidos por FFR1.5 que además requiere menor potencia para el borde de la celda.
- Del escenario 2 donde se variaron los porcentajes del radio y potencia del borde de la celda para las técnicas SFR y FFR1.5, se observó que para obtener mejores resultados en cuanto al desempeño del sistema es necesario variar los dos porcentajes del borde de la celda, esto se debe a que al incrementar el radio de la celda, las pérdidas aumentan y son más los usuarios que requieren de mayor potencia para escuchar a su eNodeB.



- Las dos técnicas de reúso de frecuencia implementadas en este trabajo de grado demostraron mitigar la interferencia inter-celda y alcanzar valores de SINR superiores a los alcanzados por UFR, mostrando mejores resultados al emplear los planificadores PF y RR.
- Los valores de SINR obtenidos por las técnicas SFR y FFR1.5 aseguran que las comunicaciones de los usuarios, tanto en el borde como en el centro de la celda, tengan una mayor calidad, lo cual ayuda a cumplir uno de los requerimientos de LTE que es prestar un servicio con mayor velocidad y cobertura.
- Del escenario 3 en el que se varió el número de celdas del sistema, se evidenció que la técnica FFR1.5 posibilita a las celdas del sistema alcanzar valores de *Throughput* similares, por otra parte la técnica SFR consigue los mayores valores de *Throughput*, presentando igualmente la mayor dispersión entre las 3 técnicas, esto muestra que FFR1.5 mitiga la interferencia inter-celda de todas las celdas que conforman el sistema por igual, mientras que la mitigación de interferencia inter-celda realizada por SFR es variable. Por lo que se concluye que es indispensable realizar un sacrificio en los recursos disponibles para mitigar de forma uniforme la interferencia inter-celda y permitir que las celdas del sistema alcancen velocidades semejantes.
- La técnica de reúso de frecuencia fraccional 1.5 realiza una mejor distribución de los recursos disponibles del sistema, esto se debe a que define 3 radios al interior de la celda. FFR1.5 es la mejor candidata a implementar en una red LTE en la vida real a pesar de que realice un sacrificio en los recursos asignados a sus celdas.

4.2 TRABAJOS FUTUROS

La implementación de la tercera versión del simulador básico a nivel de sistema para LTE y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado se presentan como referencia para trabajos futuros que desarrollen funcionalidades y análisis adicionales en el marco de la tecnología de comunicaciones móviles LTE, es por esto que se propone los siguientes trabajos:

1. Diseñar e implementar en el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, un algoritmo que permita la adaptación de las configuraciones de los porcentajes del radio y la potencia del borde la celda, cuando se varían las características de la red.



2. Implementar dentro del módulo de capacidad del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE las técnicas de Reúso de Frecuencia Parcial y Cooperativo.
3. Integrar al Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE mapas cartográficos con el fin de mostrar resultados más reales y analizar el efecto que tienen en el sistema con técnicas de reúso de frecuencia.
4. Dar a conocer el simulador desarrollado por la FIET de la Universidad del Cauca, ya que las técnicas de reúso de frecuencia no se encuentran implementadas en muchos simuladores y se siguen estudiando, se propone desarrollar un servicio WEB para el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE el cual permita actualizar fácilmente las nuevas versiones y encontrar documentación relacionada con el mismo.
5. Suplir el sacrificio de ancho de banda que realizan las técnicas de Reúso de Frecuencia para mitigar la interferencia inter-celda, al aprovechar mejor los recursos disponibles. Se propone simular la implementación de minería de datos en una red LTE para crear perfiles de usuarios, donde se consignan los hábitos en el consumo de datos de los usuarios y con esto el eNodeB les asigna, en caso de que las condiciones lo permitan, los bloques de recursos que el usuario requiere. Logrando así que no se asignen más bloques de recursos a usuarios que no los requieran.
6. Implementar diversidad espacial, es decir algoritmos que simulen un sistema MIMO, con el fin de analizar el comportamiento de las técnicas de reúso de frecuencia cuando se tiene diversidad tanto en transmisión como en recepción.
7. Analizar la sobrecarga en señalización y los retardos de procesamiento cuando se implementan técnicas de reúso de frecuencia en una red LTE.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold and P. Beming, "3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband", Elsevier, 2007.
- [2] R. Agusti, F. Álvarez, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, and O. Sallent, LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, Fundación Vodafone España, 2010.
- [3] J. Whitacre, LTE and the Evolution to 4G Wireless Design and Measurement Challenges, Agilent Technologies, 2009.
- [4] Lte, «Lte Encyclopedia,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>. [Último acceso: 12 Enero 2015].
- [5] Motorola, «Motorola,» [En línea]. Available: http://www.motorola.com/mcne/TechDocs/LTE_Technical.pdf. [Último acceso: 2 Enero 2015].
- [6] A. Lucent, «The LTE Network Architecture a Comprehensive Tutorial,» 2009.
- [7] U. d. Sevilla, «Biblioteca de Ingeniería,» 2009. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%EDtulo+2+-+LTE.pdf>. [Último acceso: 15 enero 2015].
- [8] H. Holma and A. Toskala, «LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.» 2009.
- [9] C. Serra y F. Marante, «Arquitectura general del sistema LTE,» vol. 12, nº 2, 2013.
- [10] M. Rumney, LTE and the evolution to 4G wireless: Design and measurement challenges., John Wiley & Sons, 2013.
- [11] G. P. Perrino, «Análisis del impacto del uso de técnicas de múltiples antenas en una red movil lte con la herramienta de simulación Atoll,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona de la



Universidad Politécnica de Catalunya, 2013.

- [12] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, Wiley, 2009.
- [13] Y. Xiang, J. Luo and C. Hartmann, «Inter-cell Interference Mitigation through Flexible Resource Reuse in OFDMA based Communication Networks».
- [14] A. N. Cadavid, «Análisis de capacidad en sistemas CDMA y WCDMA, usando herramientas de planificación basadas en GIS y dinámica poliédrica,» Universidad Politecnica de Valencia, 2003.
- [15] A. Alsawah, I. Fijalkow, «Optimal frequency-reuse partitioning for ubiquitous coverage in cellular systems,» 2008.
- [16] A. L. Stolyar, H. Viswanathan, «Self-organizing Dynamic Fractional Frequency Reuse in OFDMA Systems,» 2007.
- [17] S. Singh, A. Kumar, S.S. Khurmi and T. Singh, «Coordinated Multipoint (CoMP) Reception and Transmission for LTE-Advanced/4G,» *International Journal of Computer Science And Technology*, vol. 3, nº 2, p. 212, 2012.
- [18] V. Pauli, J.D. Naranjo, E. Seidel, «Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination,» *Nomor Research GmbH*, 2010.
- [19] V Pauli, E Seidel, « Inter-Cell Interference Coordination for LTE-A,» *Nomor Research GmbH*, 2011.
- [20] P. Díaz, P. Urbano y V. Quintero, «Estrategias de mitigación de interferencia para una red LTE,» *COMTEL 2012* , vol. 4, pp. 249-253, 2012.
- [21] E.-T. Mustafa, A. Mohamed y E.-B. Hesham, «Performance Evaluation of Frequency Reuse Schemes in LTE Based Network,» *18th Telecommunications Forum TELFOR 2010*, nº 18, pp. 310-313, 2010.
- [22] X. Mao, A. Maaref, K.H. Teo, «Adaptive Soft Frequency Reuse for Inter-Cell Interference Coordination in SC-FDMA Based 3GPP LTE Uplinks,» 2008.
- [23] M. Bohge, J. Gross, A. Wolisz, «Optimal Power Masking in Soft Frequency Reuse based OFDMA Networks,» de *European Wireless Conference*,



Aalborg, 2009.

- [24] Y. Xiang, J. Luo, C. Hartmann, «Inter-cell Interference Mitigation through Flexible Resource Reuse in OFDMA based Communication Networks,» 2007.
- [25] G. Giambene, «Performance Evaluation of Different Fractional Frequency Reuse Schemes for LTE,» University of Siena, Siena, Italy, 2014.
- [26] J. J. P. Aguilar, «Sistemas Moviles Celulares».
- [27] B Krasniqi, M Wrulich «Network-Load Dependent Partial Frequency Reuse for LTE,» 2009.
- [28] C. Thapa, C. Chandrasekhar, «Comparative evaluation of fractional frequency reuse (FFR) and traditional frequency reuse in 3GPP-LTE Downlink,» vol. 2, nº 4, 2012.
- [29] B. N. Fernández, L. A. Gonzales, y C. M. Hernández, «Impacto del reuso de frecuencia fraccional en la reducción de interferencia intercelda en LTE.,» *Revista de Investigaciones - Universidad de Quindío*, 2014.
- [30] Forsk, «Atoll,» [En línea]. Available: <http://www.forsk.com/web/EN/72-atoll-lte-module.php>. [Último acceso: Noviembre 2014].
- [31] T.D. Novlan, R.K. Ganti, A. Ghosh, «Analytical Evaluation of Fractional Frequency Reuse for OFDMA cellular Networks,» the Wireless Networking and Communications Group, the University of Texas at Austin and AT&T Laboratories., Austin, Texas, 2011.
- [32] E. J. Martínez y C. S. Paz, «Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE,» Tesis Universidad del Cauca, Popayán, 2014.
- [33] R. Ghaffar, R. Knopp, «Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks,» 2010.
- [34] J. Li, H. Zhang, X. Xu, X. Tao, T. Svensson, «A Sequence Frequency Reuse Scheme for Coordinated Multi-Point Transmission in LTE-AT».
- [35] U. d. I. Andes, «Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Computación,» 2014. [En



- [35] línea]. Available:
<https://sistemas.uniandes.edu.co/~csof5101/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=principal:csof5101-requerimientos.pdf>. [Último acceso: 7 Febrero 2015].
- [36] MathWorks, «MATLAB- El Lenguaje del Cálculo Técnico,» 1994-2015. [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/products/matlab/index.html>. [Último acceso: Marzo 2015].
- [37] ETSI, «ETSI TS 136 213 V8.8.0 (2009-10),» 2010.
- [38] X. Mao, A. Maaref, K.H. Teo., «Adaptative Soft Frequency Reuse for Inter-Cell Interference Coordination in SC-FDMA based 3GPP LTE Up-Links,» 2008.
- [39] D. Lee, H. Seo, B. Clerckx, E. Hardouin, «Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: deployment scenarios and operational challenges,» 2012.
- [40] R. Q. Ferrero, «Técnicas de reducción de la PAPR en modulaciones OFDM e impacto sobre amplificadores de potencia no lineales,» Universidad Politecnica de Catalunya , 2008.
- [41] D. Almeida, L. Correia y M. Serrazina, «Inter-Cell Interference Impact on LTE Performance in Urban Scenarios,» 2013.
- [42] R. Comes, F. Álvarez, F. Casadevall, F. Ferrús, J. Pérez y O. Sallent, LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Fundación Vodafone España., España: Fundación Vodafone España, 2010.
- [43] «tutorialspoint,» 2014. [En línea]. Available: http://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm. [Último acceso: 15 enero 2015].
- [44] «zoyok,» 8 septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://zoyok.com/blog/inside-lte-evolved-packet-core-epc>. [Último acceso: 15 enero 2015].
- [45] T. I. Inc., «LTE in a Nutshell: The Physical Layer,» Telesystem Innovations Inc., 2010.



- [46] A. Saburido, 11 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://www.modulo0tutoriales.com/ofdm-multiplexacion-por-division-de/>. [Último acceso: 4 febrero 2015].
- [47] Rohde&schwarz, «EventHelix,» [En línea]. Available: <http://www.eventhelix.com/lte/lte-tutorials.htm#.VNexQvmG9Cg>. [Último acceso: 4 febrero 2015].
- [48] L. Corona, «Metodología RUP,» La cueva de la sabiduría , 18 Febrero 2014. [En línea]. Available: <http://lacuevadelasabiduria.blogspot.com/>. [Último acceso: 2 Marzo 2015].
- [49] U. A. d. Madrid. [En línea]. Available: https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html. [Último acceso: 19 Abril 2014].
- [50] EEFOCUS, «Agilent Technologies,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.eefocus.com/book/08-04/408401276057576.html>. [Último acceso: Junio 2015].
- [51] M. Paolini, «Interference management in LTE networks and devices,» Senza Fili Consulting , 2012.