



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS**

OPTIMIZACIÓN DE REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIA EN AGRUPAMIENTOS DE CELDAS LTE MACRO

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

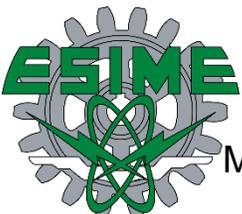
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES**

P R E S E N T A

ING. ZELTZIN ERENDIRA CONTRERAS SANTILLÁN

A S E S O R

M. EN C. MIGUEL SÁNCHEZ MERAZ



México, D. F.

JUNIO DE 2016

RESUMEN

En la última década los sistemas de comunicaciones inalámbricas principalmente los de telefonía celular han tenido un rápido desarrollo con la aparición de nuevas tecnologías y aplicaciones, por otro lado, la demanda de servicios relacionados con la telefonía crece día con día de forma exponencial con nuevos usuarios incorporándose. Todo esto ha generado que los usuarios experimenten mala calidad en los servicios cuando el proveedor no cuenta con una óptima gestión de sus recursos ya que el recurso radioeléctrico con el que se cuenta por lo general es limitado. Actualmente es posible dar solución a esta problemática mediante la aplicación de diferentes técnicas para la gestión de estos recursos, algunas de estas sugeridas para alguna tecnología en particular como lo es en el caso de LTE, sin embargo, estas sugerencias en su mayoría están basadas en escenarios ideales por lo que es necesario realizar ajustes que se apeguen a escenarios reales.

En este trabajo se propone un modelo para optimizar la capacidad de canal de un agrupamiento de celdas LTE (del inglés, Long Term Evolution) macro mediante el control de potencia para el esquema de reutilización de frecuencia fraccional FFR (del inglés, Fractional Frequency Reuse), sugerido por el 3GPP (del inglés, Third Generation Partnership Project), que además contribuya al ahorro de energía de la red reduciendo gastos del operador y beneficiando al medio ambiente. Se considera un agrupamiento de cuatro celdas, utilizando la infraestructura disponible en la zona de Lindavista para dar servicio. Se realizan estudios de cobertura para en enlace de bajada, obteniendo el promedio de la interferencia co-canal por sector. A partir de los valores de interferencia se propone un modelo de optimización que maximiza la capacidad de canal, teniendo como variables los valores de potencia de cada sector. Dicho modelo nos permite saber los valores de potencia que deben ser configurados para cada sector de tal forma que permita tener un mejor aprovechamiento del esquema de reutilización fraccional contribuyendo al ahorro de energía.

ABSTRACT

In the last decade wireless communications systems mainly cellular telephony have had a rapid development with the emergence of new technologies and applications, on the other hand, demand for services related to telephony grows daily exponentially with new users incorporated.

All this has meant that users experience poor quality services when the provider does not have an optimal management of resources as the radio resource with which account usually is limited. It is now possible to solve this problem by applying different techniques for managing these resources, some of these suggested for some particular technology as it is in the case of LTE, however, these suggestions mostly are based on ideal scenarios so that adjustments are needed to adhere to real scenarios

In this paper we propose a model to optimize the channel capacity of a cluster of macro cells LTE (Long Term Evolution) by controlling power for the FFR (Fractional Frequency Reuse) scheme suggested by the 3GPP (Third Generation Partnership Project), which also contributes to energy saving network and reducing operator costs and benefiting the environment. We consider a grouping of four cells, using available infrastructure in the area of Lindavista to service. Coverage studies are performed in downlink, by averaging the co-channel interference sector. From interference values an optimization model that maximizes the channel capacity, having as variables the power values of each sector is proposed. This model lets us know the power values to be set for each sector in such a manner that allows a better use of fractional reuse scheme contributing to energy saving.

Agradecimientos

A mis padres de lo que siempre he recibido apoyo incondicional.

ÍNDICE

RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
INTRODUCCIÓN	XIII
OBJETIVOS.....	XVI
JUSTIFICACIÓN.....	XVII

Capítulo I. Antecedentes y Estado del Arte	18
---	-----------

1.1 Introducción	18
1.2 Metodología de Investigación.....	18
1.3 Estado del Arte.....	19
1.4 Arquitectura LTE	21
1.5 Espectro radioeléctrico de LTE	23
1.6 Características LTE-TDD y LTE-FDD	27
1.7 Modulación OFDMA.....	29
1.8 Interferencia y capacidad del sistema	32
1.9 ICIC (Coordinación de Interferencia entre celda).....	36
1.10 Asignación de recursos en LTE	37
1.11 Estrategias de Asignación de recursos	38
1.12 Optimización Matemática.....	38
1.12.1 Programación no lineal	39
1.12.2 Optimización no lineal en MATLAB.....	40

Capítulo II. Técnicas de Coordinación de Interferencia	40
---	-----------

2.1 Introducción	40
2.2 Reutilización de Frecuencia	41
2.3 Técnicas de reutilización de frecuencia en LTE	43
2.3.1 Reutilización de frecuencia suave (SFR).....	44
2.3.2 Reutilización de frecuencia fraccional (FFR)	45

Capítulo III. Control de potencia	48
3.1 Introducción	48
3.2 Aspectos medioambientales del control de potencia	48
3.3 Control de Potencia en redes LTE	49
3.4 Control de potencia en el enlace descendente	50
3.5 Modelo de optimización para el control de potencia	51
Capitulo IV Pruebas y Resultados	55
4.1 Introducción	55
4.2 Escenario de Evaluación.....	55
4.2.1 Configuración de la Red	56
4.3 Solución del modelo de optimización	58
4.4 Análisis 1. Reutilización de Frecuencia Convencional	66
4.4.1 Configuración de la red.....	66
4.4.2 Análisis de nivel de C/I.....	67
4.2.3 Análisis de cobertura de descarga.....	69
4.2.4 Análisis de Modulaciones	70
4.5 Análisis 2. Reutilización de frecuencia fraccional con factor de reúso 1 al centro y 3 en bordes.	72
4.5.1 Configuración dela red.....	72
4.5.2 Análisis de nivel de C/I.....	72
4.5.3 Análisis de cobertura de descarga.....	74
4.5.4 Análisis de Modulaciones	76
4.5.5 Regiones de esquema de reúso fraccional.....	77
4.6 Análisis 3. Control de potencia.....	78
4.6.1 Configuración de la red.....	78
4.6.2 Análisis de nivel de C/I.....	79
4.6.3 Análisis de cobertura de descarga.....	80
4.6.4 Análisis de Modulaciones	81
4.7 Graficas comparativas	83

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	86
REFERENCIAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Diagrama a bloques de la metodología de investigación	18
Figura 2.- Arquitectura General de LTE	22
Figura 3.- Bandas de frecuencia móvil asignadas a la IMT-A	24
Figura 4.- Principios de operación del modo FDD y TDD.....	27
Figura 5.- Interferencia en el enlace ascendente y enlace descendente en TDD .	28
Figura 6.- Transmisión empleando OFDMA	30
Figura 7.- Reutilización de Frecuencia con factor 7	42
Figura 8.- Reutilización de Frecuencia con factor 1	43
Figura 9.- Esquema de Reutilización de Frecuencia Suave SFR.....	44
Figura 10.- Reutilización de Frecuencia Fraccional con factor de reuso 1	46
Figura 11.- Reutilización de Frecuencia Fraccional con factor de reuso 1 en el centro y 3 en losbordes	46
Figura 12.- Reutilización de Frecuencia sectorizado.....	47
Figura 13.- Esquema de interferencias	52
Figura 14. Configuración de Reutilización de Frecuencia Fraccional Sectorizado	52
Figura 15.- Asignación de canal por sector	56
Figura 17. Diagrama de radiación de la antena DPV090X14C200	57
Figura 18. Generación de la matriz de interferencia.....	58
Figura 20.- Grafica del porcentaje de área para cada nivel de interferencia para el esquema de reutilización convencional.....	68
Figura 21.- Análisis de modulaciones para el esquema de reutilización de frecuencia convencional.....	708
Figura 22.- Análisis de cobertura de descarga para el esquema de reutilizacion de frecuecnia convencional	71
Figura 23.- Grafica del porcentaje de área cubierto para cada tipo de modulación disponible para el esquema de reutilización convencional.....	71

Figura 24.- Análisis de nivel de C/I del sistema para el esquema de reutilización tradicional.....	73
Figura 25.- Grafica del porcentaje de área para cada nivel de interferencia para el esquema de reutilización convencional.....	74
Figura 26. Análisis de cobertura de descarga para el esquema de reutilización de frecuencia convencional.....	75
Figura 27.- Análisis de modulaciones para el esquema de reutilización de frecuencia convencional.....	76
Figura 28.- Grafica del porcentaje de área cubierto para cada tipo de modulación disponible para el esquema de reutilización convencional.....	77
Figura 29.- Región interna y región externa para el esquema de reutilización fraccional.....	77
Figura 30.- Análisis de nivel de C/I del sistema aplicando control de potencia al esquema FFR.....	79
Figura 31.- Grafica del porcentaje de área para cada nivel de interferencia aplicando control de potencia al esquema FFR.....	80
Figura 32.- Análisis de cobertura de descarga aplicando control de potencia al esquema FFR.....	81
Figura 33.- Análisis de modulaciones aplicando control de potencia al esquema FFR.....	82
Figura 34.- Grafica del porcentaje de área cubierto para cada tipo de modulación disponible aplicando control de potencia al esquema FFR.....	83
Figura 35.- Grafica comparativa para el análisis de C/I (Reuso convencional fraccional y fraccional con control de potencia).....	84
Figura 36.- Grafica comparativa para el análisis de cobertura de descarga (Reuso convencional fraccional y fraccional con control de potencia).....	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- Métodos de evaluación para las principales características técnicas de LTE.....	25
TABLA 2. Ventajas y desventajas de LTE FDD y LTE TDD. Fuente: Elaboración propia	28
Tabla 3 Descripción de variables del modelo de optimización	54
TABLA 4.- Ubicación de las estaciones base.....	55
Tabla 5 Matriz de Interferencia co-canal aplicando el esquema de reutilización fraccional	59
Tabla 6. Valores de potencia obtenidas de la solución del modelo.....	65
Tabla 7. Parámetros de la configuración de la red para el esquema de reutilización convencional	66
Tabla 8. Porcentaje de descarga para el esquema de reutilización tradicional.....	69
Tabla 9. Porcentaje de área descarga para el esquema de reutilización fraccional	71
Tabla 10. Porcentaje de área descarga para el esquema de reutilización fraccional	74
Tabla 11. Porcentaje de área de descarga aplicando control de potencia al esquema de reutilización FFR	81

SIGLAS

LTE	Long Term Evolution
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency Reuse
SFR	Soft Frequency Reuse
TDT	Television Digital Terrestrial
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
3GPP	The 3 rd Generation Partnership Project
GSM	Global System Mobile
GPRS	General Packet Radio Service
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
HSPA	High-Speed Packet Access
eNB	Evolved Node B
RAN	Radio Access Network
CN	Core Network
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EPC	Evolved Packet Core
UL	Uplink
DL	Downlink
TDD	Time Division Duplex
FDD	Frequency Division Duplex
C/I	Channel/Interference
QoS	Quality of Service
RRM	Radio Resource Management
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de las redes de comunicaciones móviles ha generado la necesidad de ampliar la cobertura de servicios celulares en áreas con densidad de población considerable. Esto ha llevado a que la telefonía celular sea la tecnología dominante de las comunicaciones inalámbricas. Actualmente el estándar LTE de telefonía móvil está siendo adoptado por la mayoría de los operadores en el mundo, debido a que esta tecnología es capaz de cubrir las demandas actuales considerando el crecimiento de usuarios, ofreciendo mayores tasas de transmisión y realizando la integración de servicios diferentes simultáneos [1].

Cuando una nueva tecnología se considera para realizar un despliegue a gran escala, es necesario realizar un ajuste de sus parámetros de radio frecuencia con el fin de establecer su valor óptimo. Las operadoras de telefonía celular utilizan plataformas que permiten simular la red con condiciones casi reales con el fin de reducir costos evitando gastos innecesarios.

Uno de los aspectos de mayor importancia dentro de la planeación de un sistema de comunicaciones, específicamente de telefonía celular, es considerar el espectro electromagnético disponible para poder realizar el despliegue. El espectro electromagnético es regulado por organismos nacionales e internacionales, en México el organismo encargado es el IFT. Dicho espectro puede dividirse en un conjunto de canales dependiendo el equipo y la tecnología utilizada. La asignación adecuada de frecuencias para el despliegue de una red de telefonía es importante para que la red independientemente de la tecnología utilizada pueda satisfacer la demanda [2].

Otro de los aspectos indiscutiblemente relevantes es el nivel de interferencia con el que opera una red de comunicaciones, debido a que este factor puede ocasionar problemas en la transmisión de los datos, generando una mala calidad

de servicio para el cliente provocando que las empresas proveedoras de servicios de telefonía tengan pérdidas.

Los sistemas basados en OFDMA como LTE son aún más vulnerables a la interferencia entre celdas, específicamente en el borde de la celda en donde se tiene un rendimiento degradado; atendiendo este problema se han propuesto técnicas de planificación de frecuencia para los sistemas LTE, diferentes al estándar universal de reutilización de frecuencia. [2]

Para redes LTE el 3GPP en la versión 8 establece dos principales métodos de reutilización de frecuencia: reutilización de frecuencia fraccional y reutilización de frecuencia suave. Sin embargo, la más utilizada es la fraccional debido a que el nivel de interferencia es casi uniforme en toda la celda, incluyendo los bordes.

La reutilización de frecuencia fraccional ha sido adoptada por los operadores móviles como la mejor alternativa para mejorar la calidad de servicio en los bordes de la célula. No obstante, los resultados recientes en escenarios reales indican que la configuración por defecto del esquema fraccional no es suficiente para mitigar los problemas de interferencia específicamente en el borde de la célula. [1]

A partir del año 2008, después de la publicación de la versión 8 se han realizado investigaciones y propuestas de optimización para las técnicas de reuso de frecuencia fraccional y suave, todas ellas enfocadas en el principal inconveniente, la interferencia entre células vecinas específicamente en los bordes. En los primeros trabajos publicados en 2008 se determinó el factor de reutilización óptimo de acuerdo a una clasificación de usuarios por ubicación haciendo uso de PLE, concluyendo que al aumentar el factor de reuso a 3 es posible disminuir la interferencia entre células en comparación al factor 1, además de determinar la configuración óptima de las dimensiones de las regiones interiores y exteriores para redes macro.

Aproximadamente en octubre de 2014 se contaba con servicio de LTE en limitadas zonas de del país principalmente en el DF, en la actualidad el servicio de LTE es brindado por la mayoría de las operadoras de telefonía celular en México,

aunque no en todo el país se cuente con el servicio. AT&T prevé que tardara 18 meses en dar cobertura al 75% del país [3]. Por otro lado, la reforma constitucional de telecomunicaciones aprobada en julio de 2013 define a la banda de 700 MHz como un segmento del espectro radioeléctrico identificado como “dividendo digital”, en virtud de su liberación por la transición a la Televisión Digital Terrestre. Además, establece que dicha banda es idónea para servicios de comunicaciones móviles y por sus características de propagación es posible ofrecer una amplia cobertura. [4].

Este trabajo de investigación presenta la propuesta de un modelo de optimización mediante el control de potencia para la técnica de reutilización de frecuencia fraccional, que permite maximizar la capacidad de canal del sistema mediante la asignación de potencia para cada sector. Todo esto en la zona de Lindavista en México, D.F. Se toman 4 ubicaciones de antenas ya instaladas con el fin de reducir los costos, además de tener un escenario con condiciones reales.

La estructura del trabajo se compone de 4 capítulos:

En el Capítulo 1 se describen algunos conceptos generales utilizados para el desarrollo del presente trabajo como marco teórico.

En el Capítulo 2 se desarrolla una investigación sobre las principales técnicas de coordinación de interferencia propuestas por el 3GPP para redes LTE.

En el Capítulo 3 se describe el control de potencia para redes LTE en el enlace descendente, sus principales características y el impacto ambiental. Además, se propone un modelo de optimización para el control de potencia que maximice la capacidad de canal del sistema para el enlace descendente.

Finalmente, en el Capítulo 4 se encuentra la solución, pruebas y resultados del modelo propuesto en el capítulo 3, y por último una comparación de los resultados con la optimización que proporciona mentum planet.

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer un modelo de optimización para incrementar la capacidad de canal en un agrupamiento de celdas LTE que minimice la interferencia en la red utilizando el esquema de reutilización de frecuencia fraccional (FFR) y el control de potencia en los transmisores.

Objetivos Particulares

- Evaluar el desempeño de las técnicas de asignación de frecuencia utilizadas en redes LTE.
- Determinar un modelo para evaluar la capacidad de canal de redes LTE.
- Realizar una propuesta de modelo de optimización para maximizar la capacidad de canal utilizando la técnica FFR y el control de potencia
- Realizar un análisis comparativo con respecto a la reutilización convencional y fraccional sin control de potencia.

JUSTIFICACIÓN

Las técnicas de reutilización de frecuencia propuestas por el 3GPP en la versión 8 para redes LTE tienen un costo de nivel de interferencia o capacidad del sistema, por lo que la optimización de las técnicas de reutilización de frecuencia para redes LTE es fundamental para los proveedores de telefonía celular. El control de potencia aplicado a técnicas de reutilización de frecuencia en redes LTE es una propuesta que busca el equilibrio entre el nivel de interferencia y la capacidad del sistema de la red y además ahorro de energía, mejorando el rendimiento de los usuarios ubicados en los bordes de la celda, reflejándose en el aumento de la calidad de servicio que a su vez incrementa la satisfacción de los usuarios y eleva las ganancias de los proveedores de servicios. Este trabajo propone una solución al problema antes descrito incrementando la capacidad de canal de un sistema de celdas LTE haciendo uso del control de potencia en las antenas. Beneficiando a todos los usuarios que hagan uso de la red y al proveedor de servicios. Cabe destacar que es posible aplicar la solución a diferentes escenarios que conformen un sistema de celdas LTE macro.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

En este capítulo se describe la metodología utilizada en esta investigación, además se muestran los antecedentes de LTE, algunos conceptos importantes para la comprensión de dicha red, como son su arquitectura, los parámetros característicos y el espectro radioeléctrico. Así mismo se define el concepto de interferencia e ICI y las estrategias para su mitigación. Por último, se da una breve descripción de los modelos más importantes de optimización.

1.2 Metodología de Investigación

El método de investigación aplicado fue el deductivo, ya que se partió de lo general a lo particular con el fin de llegar a la propuesta de un modelo de optimización con control de potencia para el esquema FFR. Por otra parte, se utilizó la técnica de investigación documental con la cual se revisó la información teórica sobre normatividad arquitectura y técnicas disponibles para la gestión de recursos de radio en redes LTE y así poder establecer el modelo de optimización que diera solución a nuestra problemática y que a su vez se ajustara a las normas actuales. En la Figura 1. Se muestra un diagrama de los pasos a seguir en esta investigación.



Figura 1.- Diagrama a bloques de la metodología de investigación



Identificación del problema. En esta etapa se analizó la principal problemática que genera el hecho de que el espectro electromagnético sea limitado que es la gestión de dicho recurso, el impacto sobre la capacidad de canal de los sistemas de comunicaciones inalámbricos y las consecuencias que afectan a los usuarios y proveedores de servicios. Además de ello se realiza la delimitación del tema centrándonos en redes LTE macro, y buscando el incremento de la capacidad y una gestión eficiente de los recursos radioeléctricos de esta.

Documentación teórica. Una vez identificado el problema comienza esta etapa, la cual tiene la finalidad de documentar toda la información relacionada con la gestión de los recursos de una red LTE como las técnicas de reutilización de frecuencia, normatividad, funcionamiento de una red y métodos de optimización.

Pruebas experimentales. En la etapa anterior se encuentran dos técnicas principales de aplicaciones, esta etapa esta orientada a la realización de pruebas en diferentes escenarios con la finalidad de verificar el funcionamiento de ambas. Dentro de estas pruebas experimentales surge la problemática de que las técnicas disponibles no se ajustan a las condiciones de nuestra red, problema ya identificado en el bloque de documentación teórica.

Planteamiento de la solución. De acuerdo a la normatividad y el problema central se propone un modelo de optimización.

Pruebas del modelo. Se realizan pruebas aplicando el modelo de optimización en el escenario del bloque de pruebas experimentales con la finalidad de comprobar la eficiencia del modelo. Así mismo se realizan pruebas aplicando un método tradicional y otro aplicando la técnica para la cual esta formulado el modelo de optimización.

1.3 Estado del Arte

Los sistemas de comunicaciones móviles de última generación como LTE utilizan OFDMA como esquema de acceso en el enlace de bajada, lo que genera que los usuarios ubicados en los bordes de la celda sufran gravemente interferencia inter-



Celda mejor conocida como ICI. El 3GPP y algunos investigadores alrededor del mundo han propuesto diferentes esquemas y técnicas para la mitigación del ICI en redes LTE. Posterior a la versión 8 del 3GPP, se realizaron investigaciones para la búsqueda del factor de reuso óptimo, ya que el factor a utilizar está ligado a las condiciones de la red, por ejemplo: tipo de terreno, tamaño del espectro radioeléctrico disponible y cantidad de usuarios a atender. Las primeras investigaciones se enfocaron en el análisis del comportamiento de cada uno de los esquemas con distintos factores de reuso en diferentes condiciones, esto con la finalidad de establecer el factor de reuso óptimo. Una de las primeras investigaciones fue publicada en la conferencia "Vehicular Technology Conference" de la IEEE en 2008 con el título "*Optimal Fractional Frequency Reuse In Multicellular OFDMA System*", concluyendo que un factor de reuso alto disminuye de forma considerable la interferencia pero también disminuye la capacidad del canal y la eficiencia espectral, por lo que factores altos de reuso son aplicados cuando se tiene alta disponibilidad de espectro electromagnético, de lo contrario es importante utilizar factores de reuso bajos, pero en este caso la reducción de interferencia es menor [5]. Posteriormente se realizaron investigaciones como la publicada por la universidad de ingeniería de Australia titulado "Interference Management in LTE Downlink Networks" [6] comparando la eficiencia de las técnicas propuestas por el 3GPP de acuerdo a las condiciones, en artículos publicados recientemente como en [7] y [5], se concluye que la técnica más eficiente entre ellas es la FFR. La reutilización de frecuencia fraccional reduce la interferencia co-canal; sin embargo, esta reducción no es suficiente al trabajar con OFDMA. Atendiendo esta problemática y aprovechando el nuevo concepto de redes heterogéneas, que a diferencia de las redes homogéneas permite realizar variaciones en los parámetros de la red, se plantea la solución de modificar la potencia de los sectores involucrados de la red con el objetivo de reducir los niveles de interferencia. Esto se ha logrado maximizando la capacidad de canal, solucionando mediante programación lineal y no lineal como en [8] y [1].



El control de potencia en redes inalámbricas es un tema de estudio de gran interés para investigadores de todo el mundo, ya que la implantación de mecanismos de control de potencia en redes celulares permite reducir la potencia máxima de emisión de los terminales adaptándola a las necesidades generales de la red, logrando reducir la interferencia y proporcionando un nivel aceptable de calidad de servicio [9].

1.4 Arquitectura LTE

LTE, es una red definida como nuevo concepto de arquitectura evolutiva hacia la cuarta generación. Esta tecnología es capaz de integrar las características de GSM, GPRS, UMTS y HSPA. Presenta dentro de sus principales características: alta tasa de tráfico de conmutación de paquetes, calidad del servicio y latencia mínima.

Como su nombre lo dice, LTE ha sido desarrollada como una evolución del sistema UMTS/HSPA. Este sistema es parecido a los sistemas previos y el diseño se encuentra integrado en las recomendaciones y normas del 3GPP.

El sistema LTE tiene una arquitectura menos jerarquizada ya que toda la gestión de recursos de radio es trasladada a los eNodeB, esto implica una mayor rapidez en la ejecución de los procedimientos y una latencia menor.

La arquitectura de LTE se define como el conjunto de nodos e interfaces que hacen posible la comunicación entre una estación base y una terminal de usuario móvil, consta de tres elementos principales: equipo de usuario, red de acceso y red troncal. Esta arquitectura está dividida en dos partes principales como se muestra en la Figura 2:

1. Red de Acceso\Radio Access Network (RAN)
2. Núcleo de red\Core Network (CN)

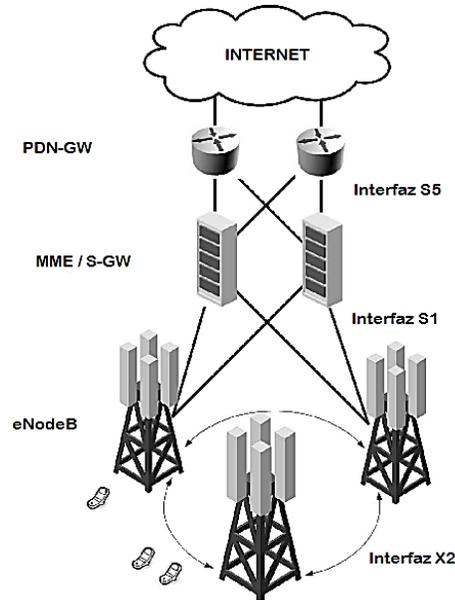


Figura 2.- Arquitectura General de LTE
Fuente: [10]

La red de acceso de radio de LTE también puede identificarse como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), y al núcleo de red como *Evolved Packet Core* (EPC) [10].

Esta arquitectura pretende minimizar el número de nodos de tal forma que la RAN esté formada por un único nodo, así como también se busca que el CN sea lo más independiente de la RAN.

Al reducir el número de nodos en la E-UTRAN surge un único nodo más complejo a diferencia del NodoB de UMTS, y es llamado eNodoB, este realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio.

Se tienen dos tipos de interfaces dentro de la red de acceso de radio que es la S1 que es la que conecta la E-UTRAN con el EPC y la interfaz X2 que conecta un eNodoB con otro. Esta interfaz X2 se utiliza para la movilidad y para las funciones de gestión de recursos de radio multicelular [10].

Principales Funciones de la RAN



- Codificación, entrelazado, modulación, etc.
- Función ARQ, compresión de cabecera, etc.
- Funciones de seguridad como cifrado, protección de integridad, etc.
- Gestión de recursos de radio, handover, etc.

Principales Funciones del CN

- Gestión del costo mensual de cada usuario
- Gestión de suscriptores
- Gestión de movilidad
- Gestión de portadora y de la calidad de servicio
- Control de datos de usuario e interconexión a redes externas

1.5 Espectro radioeléctrico de LTE

LTE se caracteriza por su flexibilidad espectral. La interfaz de radio puede operar en bandas con diferente tamaño, en [11] se establecen tamaños de: 1 MHz, 4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz para el enlace de subida UL del inglés Uplink y el enlace de bajada DL, del inglés Downlink. Esta característica permite que una red LTE puede desplegarse en diferentes bandas de frecuencia con diferentes características esto con el fin de aprovechar al máximo el recurso y cubrir con las necesidades, además de que dependiendo en la región en la que estemos será la técnica de transmisión TDD o FDD.

El 3GPP establece que una red LTE debe funcionar ya sea en TDD o FDD. En el modo FDD la transmisión de una estación base a un terminal móvil se realiza en un tiempo a la vez, pero con diferentes frecuencias a diferencia de TDD que utiliza la misma frecuencia, pero en instantes de tiempo diferentes. La banda de operación elegida debe tener la posibilidad de operación de los 450 MHz hasta 3.4 GHz en bandas disponibles ya definidas o por migración de sistemas antiguos como lo es la banda de 700 MHz en México. El ancho de banda asignado para la transmisión en LTE puede ser mayor o menor lo que permite que pueda haber migración de otras tecnologías de acceso de radio. El ancho de banda para

transmisión varía de 1 MHz a 20 MHz en pasos de 180 KHz, aunque en la especificación [11] únicamente se establecen los antes mencionados.

En 1992, las Naciones Unidas alcanzan grandes acuerdos a nivel global para designar las bandas de frecuencia de IMT, incluidos IMT-2000 e IMT-A. estas reuniones conocidas como WRC, se realizan cada tres o cuatro años. Como LTE es miembro de la familia IMT también puede desplegarse en cualquiera de las bandas reconocidas de esa familia. Las bandas de trabajo para IMT son las que muestran en la Figura 3: [10]

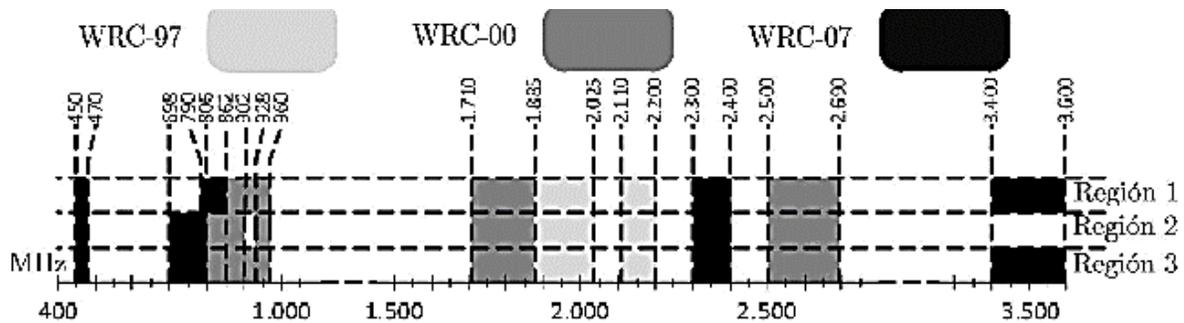


Figura 3.- Bandas de frecuencia móvil asignadas a la IMT-A

Fuente: [10]

Son algunas de las asignaciones establecidas por Región.

El 3GPP define los requisitos mínimos de rendimiento de radiofrecuencia para terminales UE y las estaciones base eNodeB. Los requisitos de rendimiento son una parte esencial de la norma LTE ya que facilitan un rendimiento del sistema consistente y predecible en un entorno de múltiples proveedores. Las especificaciones correspondientes se dan en [12], [13], [14] que cubre ambos modos dúplex de LTE: FDD y TDD [15].

Hasta ahora la asignación de bandas de frecuencia solo es recomendación. Para los requisitos de prestaciones técnicas existen diez indicadores. En la Tabla 1 se muestra el método de evaluación para cada característica técnica



TABLA 1.- Métodos de evaluación para las principales características técnicas de LTE
Fuente: [10]

Característica a evaluar	Simulación	Método Analítico	Inspección
Eficiencia espectral de la celda	X*		
Eficiencia espectral del pico		X	
Ancho de banda y escalabilidad			X
Eficiencia espectral en el borde de la celda	X*		
Latencia en el plano de control		X	
Latencia en el plano de usuario		x	
Movilidad	X**		
Tiempo de interrupción al realizar handover en la misma o distinta frecuencia		X	
Handover entre sistemas			X
*Simulación a nivel de sistema			
**Simulación a nivel de enlace y de sistema			

El ancho de banda en IMT debe ser escalable para poder operar en diferentes bandas del espectro a través de una única o múltiples portadoras de radiofrecuencia. La escalabilidad debe ser al menos 40 MHz y el ancho de banda máximo es de 100 MHz.

Dado el aumento tráfico en las redes inalámbricas, se ha considerado todas las posibilidades para el incremento de la capacidad. Es por eso que en los últimos años se ha planteado la reconsideración de la asignación y uso del espectro radioeléctrico frente a los procedimientos clásicos. Las propuestas abarcan distintos rubros, sin embargo, deben ponderarse adecuadamente teniendo en cuenta los aspectos técnicos, regulatorios, impacto en el modelo de negocio y competencia.



Una posible clasificación de los modelos de uso del espectro radioeléctrico que permita cumplir con los requerimientos de las redes LTE que se han planteado en [16], y son los siguientes:

Modelo de uso exclusivo de derechos. En este caso se realiza la asignación de licencias exclusivas a operadores para ciertas bandas de frecuencias, que pueden estar ligadas o no con el uso de una determinada tecnología y la provisión de determinados servicios.

Modelo de uso común del espectro. Se promueve el acceso compartido por parte de una serie de usuarios a una determinada banda del espectro radioeléctrico. La responsabilidad de la gestión de la interferencia en este caso recae directamente entre los propios usuarios. Dentro de este caso puede distinguirse el modelo de uso público (en el que el espectro está abierto a todos los usuarios con los mismos derechos, como sería el caso de la banda ISM – *Industrial, Scientific and Medical*) y el privado (en que es el adjudicatario de una licencia el que permite el acceso al espectro licenciado a un conjunto de usuarios bajo unas condiciones establecidas por el propio adjudicatario).

Modelo de uso oportunista del espectro. Se permite que el denominado usuario secundario (que pretende acceder a una banda de espectro licenciada al denominado usuario primario) identifique de manera independiente bandas de espectro que no se estén utilizando en un cierto tiempo y lugar, pudiéndolas utilizar en ese caso siempre que se asegure que no generará interferencia dañina para el usuario primario. Dentro de este caso puede distinguirse entre el modelo *underlay* en el que la interferencia al usuario primario se evita transmitiendo una señal con una densidad espectral de potencia que se encuentre por debajo del nivel de ruido, y el *overlay*, en el que no se da esta coexistencia, sino que el usuario secundario debe detectar y aprovechar los huecos espectrales libres de usuario primario.

1.6 Características LTE-TDD y LTE-FDD

El principio de TDD es usar la misma banda de frecuencias para la transmisión y recepción.

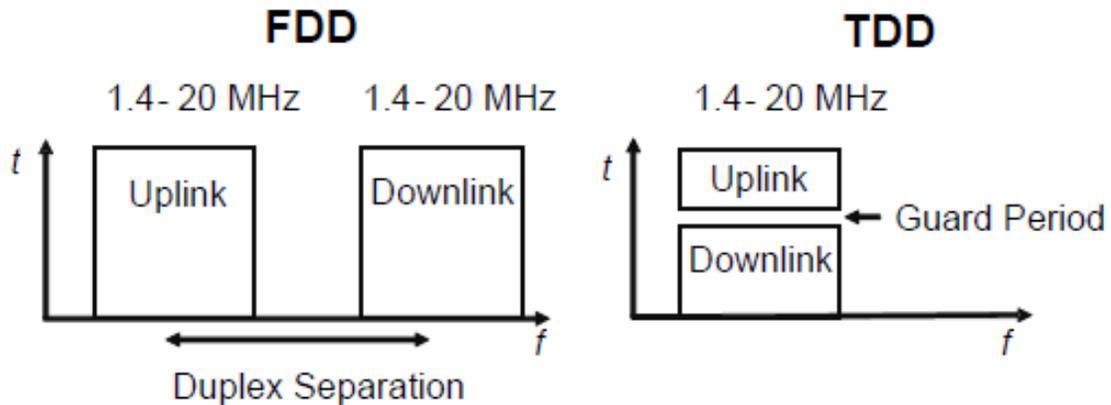


Figura 4.- Principios de operación del modo FDD y TDD

Fuente: [10]

Como se muestra en la Figura 4, una diferencia fundamental en comparación con FDD es que se utilizan diferentes frecuencias para la recepción y la transmisión continua UE. Como FDD y TDD en LTE soporta anchos de banda de 1,4 MHz hasta 20 MHz como ya se había mencionado anteriormente, pero dependiendo de la banda de frecuencia, el ancho de banda soportados puede ser menor que el rango completo. Por ejemplo, para la banda de 2,5 GHz, no se utilizará los anchos de banda más pequeños [17].

Dado que el ancho de banda es compartido entre enlace ascendente y enlace descendente y el ancho de banda máximo se especifica para ser 20 MHz en [18], las velocidades de datos máximas alcanzables son menores que en LTE FDD. De esta manera la misma capacidad de procesamiento del receptor y el transmisor se puede utilizar con ambas TDD y FDD modos que permiten un despliegue más rápido de LTE [15].

El sistema TDD puede ser implementado en una banda no apareado (o en dos bandas apareadas por separado), mientras que el sistema FDD siempre requiere

de un par de bandas con una separación razonable entre las direcciones de enlace ascendente y enlace descendente, conocidas como la separación dúplex. En una implementación FDD UE su normalmente requiere un filtro dúplex cuando se facilita la transmisión y recepción simultánea. En TDD el enlace ascendente y descendente comparten la misma banda de frecuencia, las señales en estas dos direcciones de transmisión pueden interferir unos con otros como se muestra en la Figura 5 [15].

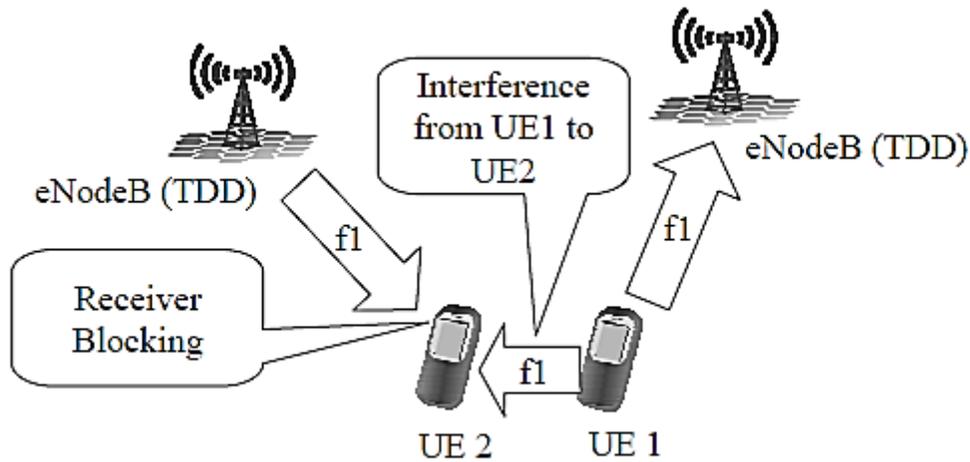


Figura 5.- Interferencia en el enlace ascendente y enlace descendente en TDD
Fuente: [15]

En la TABLA 2 se muestra un resumen de las ventajas y desventajas de TDD y FDD [19].

TABLA 2. Ventajas y desventajas de LTE FDD y LTE TDD. Fuente: Elaboración propia
Fuente: [19]

Parámetro	LTE TDD	LTE FDD
Espectro alineado	No requiere por que la transmisión y recepción es en el mismo canal	Si requiere con separación suficiente en frecuencia para permitir transmisión y recepción simultanea
Costo	No requiere duplexor por lo que el costo disminuye	Aumenta el costo por duplexor
Asimetría DL/UL	Es posible cambiar la capacidad de DL y UL para satisfacer la demanda	La capacidad de DL/UL está determinada por la asignación de frecuencia estática

Banda de guarda	Es necesario para no generar interferencia en UL y DL. Los periodos de guarda largos limitan la capacidad del enlace, sin embargo, estos no son necesarios para la transmisión a larga distancia.	Es necesaria una banda de guarda para evitar interferencia entre DL y UL, sin embargo, esta banda de guarda no limita la capacidad del sistema
Transmisión discontinua	Es necesaria para permitir ambas transmisiones (UL y DL), esto puede degradar el rendimiento de los circuitos como los amplificadores.	Utiliza transmisión continua

1.7 Modulación OFDMA

La interfaz radio de E-UTRAN utiliza la técnica de modulación OFDMA para el enlace descendente. Esta técnica se basa en el uso de mecanismos de transmisión multiportadora, gracias a la propiedad de ortogonalidad presente en todas las subportadoras es posible transmitir un conjunto de símbolos multiplexados sobre las mismas, facilitando su posterior recuperación en el receptor.

En el dominio de la frecuencia el espectro de las subportadoras es una función sinc con el máximo ubicado en la frecuencia central de transmisión de esa subportadora y ceros o lóbulos secundarios cada $1/T_S$ Hz, en donde T_S es el periodo de símbolo. La separación Δf entre cada par de subportadoras es igual al inverso de T_S . Para cada frecuencia central solo existe contribución espectral debida a una de las subportadoras. En la Figura 6 se muestra una representación esquemática de la transmisión empleando OFDMA, indicando sus principales elementos.

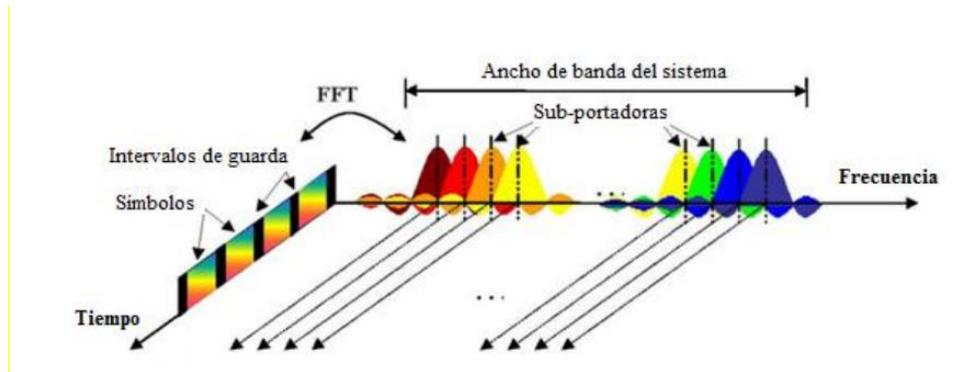


Figura 6.- Transmisión empleando OFDMA

Fuente: [20]

Un fenómeno común en los sistemas de comunicaciones móviles es la propagación multitrayectoria que es la causa principal de que se tenga una recepción de distintas réplicas de la señal original transmitida, estas replicas tienen un retardo y valores de amplitud y fase diferentes. Los efectos consecuentes a la propagación multitrayectoria sobre los sistemas OFDMA son principalmente dos:

- Pérdida de ortogonalidad entre subportadoras
- Interferencia entre símbolos

Para su mitigación, es común el uso de la transmisión del prefijo cíclico, que consiste en alargar el periodo de símbolo introduciendo al principio una réplica de la señal que se envía durante los últimos TP segundos del mismo.

En LTE es posible usar dos tipos de prefijo cíclico, el normal y el extendido, y por lo general se consigue reducir en gran medida el efecto negativo de la propagación multitrayectoria, la transmisión del prefijo cíclico supone una menor eficiencia en términos de potencia transmitida y de velocidad de transmisión, ya que no toda la señal enviada se convertiría en información útil [20].

Por otra parte, OFDMA no impone ninguna condición sobre los símbolos que se modulan sobre las diferentes subportadoras, por lo que el número de bits por símbolo puede ser variable. Si se quiere incrementar la velocidad de transmisión, resultará conveniente utilizar modulaciones con alta eficiencia espectral, como la

16- QAM o la 64-QAM. El problema para que esto pueda llevarse a cabo es que la relación señal a ruido SNR del canal radio debe ser suficientemente alta como para no provocar un aumento de la probabilidad de error de bit o de bloque. Si éste no es el caso, lo recomendable es transmitir con una modulación más robusta, como la QPSK. Las denominadas estrategias de Adaptación del Enlace se encargan de extraer el máximo rendimiento del canal en términos de velocidad binaria mediante la elección de la modulación que permita enviar el mayor número de bits/símbolo para unas condiciones de SNR dadas.

En resumen, las ventajas que ofrece la utilización de OFDMA en este tipo de redes móviles son muy numerosas, siendo las más importantes: [20]

- Diversidad multiusuario y multifrecuencia a la hora de asignar recursos físicos a los usuarios: permite realizar una calendarización dinámica para conseguir una mayor eficiencia espectral, distribuyendo a los usuarios sobre las subportadoras en las que presenten unas mejores condiciones de propagación del canal.
- Flexibilidad en la banda asignada a cada usuario: permite conceder distintos anchos de banda a cada usuario, para poder suministrarles diferentes tasas de datos. También es posible asignar a un mismo usuario varios conjuntos de subportadoras no contiguas.
- Robustez frente a la propagación multitrayectoria, que como hemos visto se logra gracias a la utilización del prefijo cíclico.
- Posibilidad de trabajar con un factor de reutilización de frecuencias igual a la unidad, mediante las propiedades de ortogonalidad y una calendarización apropiada de los usuarios en los bordes de las celdas.
- Sencillez de implementación en el dominio digital, mediante dispositivos electrónicos y chips que permiten efectuar rápidamente una IFFT en el módulo transmisor y una FFT en el receptor.

También existen algunos inconvenientes, como son la elevada relación entre la potencia de pico y la potencia media PAPR, y la susceptibilidad frente a errores en



frecuencia, como los provocados por el efecto Doppler asociado al movimiento de los terminales, que requieren del diseño de mecanismos de sincronización específicos. Las señales con un alto valor de PAPR requieren amplificadores de potencia muy lineales, para evitar la distorsión asociada a la intermodulación. Esto se traduce en que la eficiencia de los amplificadores, entendida como el cociente entre potencia transmitida y potencia consumida, se reduce. Como el consumo de potencia y el coste de los equipos no son factores críticos de un eNodeB, se decidió emplear la modulación OFDMA en el enlace descendente de la interfaz radio de LTE. A esto hay que añadir que el receptor OFDMA sólo requiere de una transformada FFT que no presenta gran complejidad para implementarse en el terminal móvil.

1.8 Interferencia y capacidad del sistema

Como se ha mencionado anteriormente, el acelerado crecimiento de las redes inalámbricas demanda un uso eficiente de espectro electromagnético. La principal problemática que se tiene para hacer esto posible es a causa de interferencias causadas por el reuso de frecuencias.

La interferencia es un factor importante que limita el rendimiento de las redes inalámbricas, causando una considerable disminución de la capacidad de canal. Los niveles de interferencia varían dependiendo el tipo de zona, por ejemplo, son mayores en áreas urbanas en donde se tiene una mayor concentración de estaciones base y equipos móviles.

El nivel de interferencia es medido por la relación señal-interferencia en el extremo receptor, el nivel de interferencia depende de muchos factores, como la distancia entre transmisores y receptores, la posición geográfica de los transmisores, la potencia de la señal, la dirección en que la señal se transmite, y las condiciones del tiempo. En caso de que el nivel de interferencia sea alto, la relación señal-a-interferencia puede causar una calidad inaceptable. Sin embargo, la disponibilidad limitada de frecuencias ocasiona su reuso por los múltiples transmisores dentro de la misma red. [21]



La interferencia puede ser definida como el efecto de una energía no deseada debido a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones, sobre la recepción, cuya manifestación puede ser degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información. [21]

Los dos tipos de interferencia que afectan el funcionamiento de la red son la interferencia co-canal y la interferencia adyacente. Estos tipos de interferencia son difíciles de controlar debido a que los efectos de propagación son aleatorios, por ejemplo, el número de usuarios que estarán conectados al mismo tiempo, las condiciones climáticas o simplemente fallas del propio equipo de la red.

En la práctica la causa principal de interferencia es debido a la limitada disposición de espectro radioeléctrico, que obliga a las empresas operadoras a transmitir muy cerca de la otra o realizar su distribución de canales con bandas muy cercanas en área geográfica para poder maximizar el uso del recurso disponible

Interferencia Co-canal

La reutilización de frecuencias genera que una misma área de cobertura existan celdas que usen el mismo canal, estas celdas son llamadas celdas co-canales, y por tanto la interferencia generada entre estas celdas se le llama interferencia co-canal. Para reducir la interferencia co-canal las estaciones bases deben estar físicamente separadas por una distancia mínima que proporcione el suficiente aislamiento.

Principalmente se pueden clasificar los métodos de reducción como:

- Aumento de la separación de las celdas co-canal
- Uso de antenas direccionales
- Reducción de alturas efectivas de antenas

Para poder reducir la interferencia co-canal las celdas deben tener una separación por una distancia mínima que proporcione suficiente aislamiento.

Relación Señal a Interferencia (SIR)

Considere una red con n transmisores/receptores. Las potencias de transmisión están denotadas por P_1, \dots, P_n . El transmisor i transmite idealmente al receptor i , sin embargo, el receptor recibe señales de los transmisores interferentes, además del ruido AWGN. Es posible calcular la SIR de cada receptor con la ecuación 1 [22]

$$SIR = \frac{P}{\sum_{i=1}^n I_i + \sigma} \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Donde:

P: Potencia del transmisor

I_i: Interferencia co-canal de la estación i

σ : AWGN = -174 dBm para LTE

La intensidad de la señal decrece mientras que el nivel de interferencia y ruido con la distancia desde el transmisor. El concepto relación señal a interferencia es muy importante en el diseño de comunicación y se define como el cociente de la potencia de la señal entre la potencia de ruido que decrece constantemente a lo largo del canal y debajo de cierto valor para esta relación la amplificación de la señal que se recibe no resulta útil pues el ruido se amplifica en la misma proporción. [22]

Interferencia Adyacente

La interferencia entre canales adyacentes se genera a partir de las señales que son adyacentes en frecuencia a la señal deseada. Este tipo de interferencia se puede generar por imperfecciones en los filtros de los receptores y transmisores, que permiten a las frecuencias cercanas interferir dentro de la banda pasante, o también al asignar canales contiguos a sectores de una misma estación base. Al no tener un control adecuado de este tipo de interferencia se pueden tener problemas en caso de que un usuario este transmitiendo en un rango muy próximo al canal de recepción de otro usuario, o dos usuarios que estén transmitiendo en canales cercanos, la estación base puede tener dificultad para discriminar al usuario interferente del deseado. Este tipo de interferencia se puede mitigar mediante correcta asignación de frecuencias. Dado que cada celda maneja sólo

un conjunto del total de canales, los canales a asignar en cada celda no deben estar próximos en frecuencias. [21]

Capacidad de canal

El teorema de Shannon-Hartley es una aplicación del teorema de codificación para canales con ruido. El teorema establece que la capacidad del canal de Shannon es la máxima cantidad de bits que pueden ser transmitidos sin error con un ancho de banda específico y que además se le adiciona la interferencia del ruido.

El teorema de Shannon-Hartley indica que la capacidad del canal C en función de la SIR para un sistema de comunicación se expresa en la Ecuación 2.

$$C = B \log_2(1 + SIR) \quad (2)$$

Donde:

B: Ancho de Banda del canal

Esta fórmula es válida para un retardo infinito y un código de bloque de tamaño infinito en un canal con ruido aditivo blanco gaussiano.

La fórmula de la ecuación 2 para el cálculo de la capacidad de canal no se puede alcanzar en la práctica, por lo cual, para representar estos mecanismos de pérdida con mayor precisión, se utiliza una fórmula de capacidad de Shannon modificada establecida en [23] expresada en la Ecuación 3.

$$C_{LTE} = W_{eff} \eta \log_2 \left(1 + \frac{SIR}{SIR_{eff}} \right) \quad (3)$$

Donde BW_{eff} se ajusta para la eficiencia del ancho de banda del sistema de LTE y SIR_{eff} se ajusta para la eficiencia de la ejecución de SIR de LTE, para un canal de 10 MHz el valor de la SIR_{eff} es de 0.9. El factor η es un factor de corrección que debe ser nominalmente igual a uno [23].



1.9 ICIC (Coordinación de Interferencia entre celda)

Cada vez más están migrando su sistema de comunicaciones a la tecnología LTE, sin embargo, las limitaciones en cuanto a espectro radioeléctrico es un problema. Las redes heterogéneas son la clave para aumentar la eficiencia espectral, cuando las operadoras consiguen aplicar estos métodos, la interferencia entre celdas es el factor que limita la posibilidad del sistemas en satisfacer las necesidades de la mayoría de usuarios, por este motivo los investigadores están centrados en trabajar sobre la coordinación de interferencias entre celdas (ICIC), para establecer los estándares de las próximas generaciones de telefonía móvil e incluso sobre la actual LTE

El esquema de acceso de radio en LTE proporciona ortogonalidad entre los usuarios de una celda tanto para el enlace descendente como para el ascendente. Por tal motivo, las prestaciones de LTE en términos de eficiencia espectral están más limitadas por las interferencias provenientes de celdas vecinas en comparación con lo que se tenía en las tecnologías de 3G. cualquier técnica que permita reducir la interferencia entre celdas mejorara las prestaciones de LTE, en términos de calidad de servicio principalmente para los usuarios de los bordes de la celda.

Un objetivo clave en el despliegue de una red LTE es utilizar un reuso de frecuencia completo, es decir, utilizar todo el ancho de banda en todas las celdas de la red para maximizar la eficiencia espectral. Sin embargo, las redes basadas en OFDMA en donde la capacidad está limitada por las interferencias, esto supone una degradación significativa de las tasas de transmisión en los bordes de la celda. Esto es porque la pérdida por propagación es proporcional a la distancia entre el receptor y el transmisor, de tal forma que si un usuario se aleja de su estación base servidora experimenta una disminución de la potencia de la señal útil y un incremento en la potencia de las señales interferentes

La coordinación de interferencias implica aplicar ciertas restricciones en el dominio de la frecuencia tanto para el enlace ascendente como para el descendente,



configurando el equivalente a esquemas de reuso en frecuencia para el interior y para el exterior de la celda que permitan una disminución del nivel de interferencia.

1.10 Asignación de recursos en LTE

Uno de los aspectos de mayor relevancia para los operadores de sistemas de comunicaciones inalámbricas es la gestión eficiente de los recursos radioeléctricos disponible. Este recurso electromagnético es limitado para cada operador, y debe satisfacer las necesidades de toda la red de dicho operador, además de ofrecer cierto nivel de QoS. Para LTE existe un área encargada de la administración de estos recursos denominada RRM.

La gestión de recursos de radio RRM es el control de nivel del sistema de la interferencia co-canal y otras características de transmisión de radio en sistemas de comunicación inalámbrica, por ejemplo, redes celulares, redes inalámbricas y sistemas de radiodifusión.

RRM Implica estrategias y algoritmos para controlar parámetros como la potencia de transmisión, la asignación de usuario, la formación de haz, velocidades de datos, criterios de traspaso, esquema de modulación, esquema de codificación de error, etc. El objetivo es utilizar el espectro de frecuencias radioeléctricas limitados recursos y la infraestructura de red de radio la manera más eficiente posible.

Esquemas RRM dinámicas eficientes pueden aumentar la eficiencia espectral del sistema en un orden de magnitud, que a menudo es mucho más de lo que es posible mediante la introducción de esquemas de codificación de canal y fuente avanzadas. RRM es especialmente importante en los sistemas limitados por la interferencia co-canal en lugar de por el ruido, por ejemplo, los sistemas celulares y redes de difusión que cubren grandes áreas, de forma homogénea y redes inalámbricas que consta de muchos puntos de acceso adyacente Que pueden reutilizar las mismas frecuencias de canal.



1.11 Estrategias de Asignación de recursos

Las estrategias de asignación de recursos para el control del ICIC pueden clasificarse principalmente en: [10]

- Estáticos
- Autoconfigurables
- Celda-Adaptables
- Usuario-Adaptables
- Sincronizados
- Distribuidos
- Semi-distribuidos
- Centralizados

Siendo los estáticos los utilizados por operadores, estos se realizan en la etapa de planificación, incluyen esquemas de reuso fijo, reuso fraccional y reuso suave sugeridos en el reléase 8 del 3GPP [10].

1.12 Optimización Matemática

Un problema en que se desea maximizar o minimizar una función, la cual tiene argumentos que pueden estar sujetos a ciertas restricciones se conoce como problema de optimización. [24]

Es común clasificar los problemas de optimización de acuerdo a las características de la función objetivo y sus restricciones

Un problema de optimización consiste en

$$\text{maximizar } f(x) \quad (4)$$

Sujeta a:

$$g(x) = 0, h(x) \geq 0 \quad (5)$$

En donde la ecuación 4 es la función objetivo, y la ecuación 5 son las restricciones de igualdad o desigualdad. De acuerdo a la clasificación establecida existen diferentes métodos de solución.

El modelo de optimización planteado en este trabajo la función objetivo es la ecuación de la capacidad de canal de Shannon, clasificándose, así como un problema de optimización no lineal.

1.12.1 Programación no lineal

Un problema es definido como “no lineal” cuando la función objetivo o alguna de las restricciones son funciones no lineales, una formulación general se muestra a continuación

$$PNL \begin{cases} \min/\max f(x) \\ h_i(x) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \\ g_j(x) \leq 0 \quad \forall j = 1, \dots, p \end{cases}$$

Donde $f, h_i, g_j: A \rightarrow \mathbb{R}$ son funciones reales de varias variables reales definidas sobre los puntos $x = (x_1, \dots, x_n)$ del conjunto $A \subseteq \mathbb{R}^n$. Por regla general el conjunto A será abierto y en la mayoría de las ocasiones $f, h_i, g_j \in C^1(A)$, es decir, las funciones del problema serán derivables sobre A con derivadas parciales continuas.

Resolver un problema no lineal es encontrar los óptimos ya sean máximos o mínimos de la función $f(x)$ no sobre todo el conjunto A donde está definida la función, sino sobre el conjunto factible de los puntos que cumplen todas las restricciones.

Existen diferentes métodos de solución a este tipo de problemas, la elección de método es de acuerdo a la complejidad del problema, clasificación y herramientas disponibles para la solución.

Actualmente se cuenta con una amplia variedad de herramientas de software que permiten encontrar la solución a problemas de optimización, además de contar



con un avance en equipos de cómputo con la capacidad de procesamiento necesario para la búsqueda del valor óptimo.

1.12.2 Optimización no lineal en MATLAB

MATLAB cuenta con una caja de herramientas que incluye solucionadores de programación lineal, programación lineal entera mixta, programación cuadrática, optimización no lineal, y no lineal de mínimos cuadrados. Puede utilizar estos solucionadores de encontrar soluciones óptimas a los problemas continuos y discretos, realizar análisis de equilibrio, e incorporar métodos de optimización en los algoritmos y aplicaciones. Existen diferentes algoritmos integrados a funciones predefinidas por la plataforma que permite maximizar o minimizar una función objetivo satisfaciendo una o más restricciones.

La función que es utilizada para la solución del modelo de optimización es la función `fmincon`. La función `fmincon` permite la solución de modelos no lineales en los cuales se tienen restricciones lineales. El método de solución está clasificado dentro de los métodos de gradiente.

CAPÍTULO II. TÉCNICAS DE COORDINACIÓN DE INTERFERENCIA

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describen las principales técnicas de planificación de frecuencia para el control de interferencias propuesto por el 3GPP. Se hace



énfasis desarrollando la técnica de reutilización fraccional ya que el modelo de optimización de este trabajo está basado en la combinación de dos de sus principales variantes: FFR sectorizado y FFR con reuso 3 en bordes y 1 en el centro.

2.2 Reutilización de Frecuencia

La planificación de frecuencias puede definirse como un proceso mediante el cual se asignan frecuencias y se configuran parámetros de un sistema de comunicaciones inalámbrico con el fin de proporcionar la cobertura y capacidad necesarias a la red [22].

La cobertura está referida a la región geográfica en la que el sistema puede proveer una señal la cual sea capaz de establecer una comunicación ya sea de datos o una llamada dependiendo el sistema. Por otro lado, la capacidad del sistema está relacionada con la cantidad de usuarios que puede soportar el sistema simultáneamente dando servicio cumpliendo con los parámetros de calidad establecidos en las normas de la tecnología en uso. En LTE la capacidad y la cobertura son indirectamente proporcionales. Para mejorar la cobertura es necesario sacrificar capacidad y viceversa. Es por esto que se debe llegar a un compromiso entre estos objetivos a la hora del diseño [22].

La planificación de frecuencias de una red de telefonía inalámbrica implica estrategias y algoritmos para controlar parámetros como la potencia de transmisión, asignación de usuarios, esquema de modulación, dimensionamiento de las celdas, control de interferencias, entre otras. El objetivo es utilizar los limitados recursos del espectro de frecuencias radioeléctricas y la infraestructura de red de radio de la manera más eficiente posible.

Como ya se ha mencionado el espectro es un recurso escaso, entonces la única forma de brindar una cobertura nacional es reutilizándolo, esto significa que los canales que se usan en un área geográfica podemos reutilizarlo en otra área, a condición que la interferencia co-canal este dentro de los límites permitidos. El

reúso de frecuencia permite reutilizar canales de frecuencia en distintas zonas geográficas y garantizar un nivel de interferencia adecuado [21].

Un concepto clave dentro de los esquemas de reutilización de frecuencia es el factor de reúso, que se define como en número de veces que será dividido el espectro disponible. Mientras mayor es el factor de reúso de frecuencia, mayor es la separación entre celdas co-canal y menor es la interferencia, pero se tiene menor capacidad, o se deben tener más espectro para mantener una capacidad dada.

Como se muestra en la Figura 7 el factor de reúso utilizado es 7, por lo tanto, el espectro disponible se divide en 7 fracciones, cada fracción de espectro es asignada a cada celda, disminuyendo el nivel de interferencia entre celdas. El factor de reúso ideal es el 1 como se muestra en la Figura 8, pero desafortunadamente en la práctica es muy ineficiente por los problemas de interferencia.

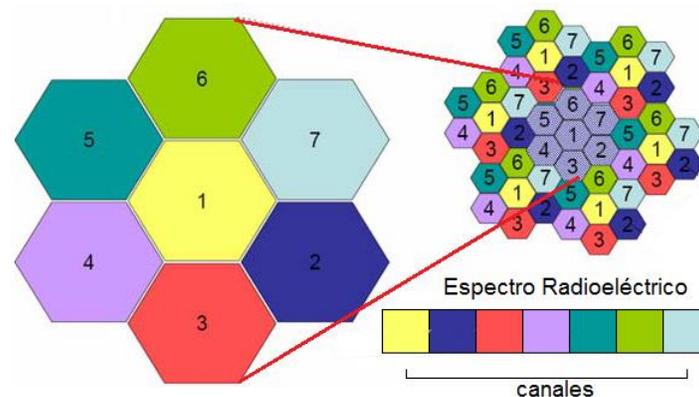


Figura 7.- Reutilización de Frecuencia con factor 7
Fuente: [21]

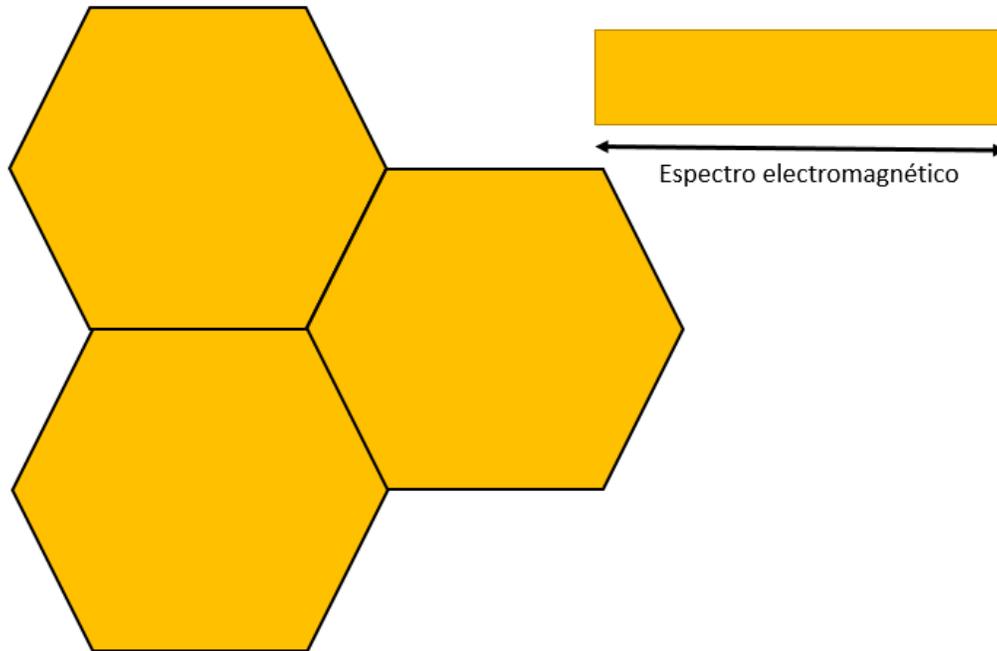


Figura 8.- Reutilización de Frecuencia con factor 1
Fuente: Elaboración propia

2.3 Técnicas de reutilización de frecuencia en LTE

Para sistemas LTE el 3GPP ha propuesto técnicas de planificación de frecuencia, en la versión 8 se sugiere dos principales métodos de reutilización de frecuencia: reutilización de frecuencia fraccional y reutilización de frecuencia suave, sin embargo, puede utilizarse cualquiera ya que no es una norma [7].

Los esquemas de reutilización se diferencian de acuerdo a como es distribuido el espectro electromagnético en la celda de trabajo. Como se mencionado anteriormente en los sistemas de cuarta generación

El esquema más utilizado por los operadores de servicio es el esquema FFR, ya que mediante la correcta elección de los factores de reuso permite una disminución de interferencia mayor en comparación a los otros esquemas, sin embargo, se tiene un costo de capacidad de canal y eficiencia espectral [7].

2.3.1 Reutilización de frecuencia suave (SFR)

SFR es un esquema de reutilización de frecuencias sugerido en la versión 8 por el 3GPP para ser aplicado en redes LTE con el fin de optimizar el uso del espectro radioeléctrico, además de reducir la interferencia inter celda.

Consiste en dividir el área de la celda en dos regiones como se muestra en la Figura 9, una región central en donde toda la banda de frecuencias está disponible y una zona de borde de la celda donde está disponible sólo una pequeña fracción del espectro. El espectro dedicado para el borde de la celda también puede usarse en la región central si no se está utilizando en el borde de la celda, sin embargo, queda consideración del operador. Para realizar esta última parte también existen algoritmos de clasificación de usuario que pueden ser aplicados como lo es la clasificación por jerarquía de usuario dando prioridad a un grupo de terminales, por nivel de potencia recibida por el usuario y por nivel de interferencia.

Cabe destacar que para este esquema de reutilización la falta de espectro en el borde de la celda puede dar lugar a muy reducida capacidad de canal, sin embargo, puede mejorar mediante la asignación de las portadoras de alta potencia a los usuarios en esta región mejorando así la SIR y la capacidad de canal.

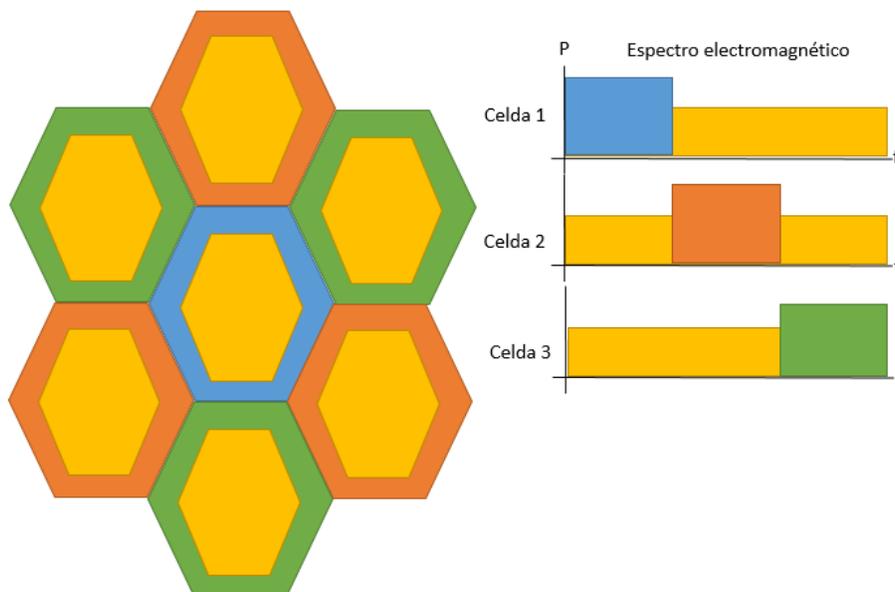


Figura 9.- Esquema de Reutilización de Frecuencia Suave SFR
Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Reutilización de frecuencia fraccional (FFR)

La reutilización de frecuencia fraccional ha sido aceptada como una técnica por muchos investigadores en los últimos años para superar la interferencia entre células e interferencias co-canal y la interferencia entre celdas. Esta técnica se basa dividir la celda en dos regiones, la interior y exterior, regiones a las que se les asigna diferentes bandas de frecuencia, por ejemplo, en el centro de la celda se emplea reuso 1, mientras que en los bordes sólo se usan algunas subportadoras como se muestra en la Figura 10, o el caso más común con mayor implementación por los operadores de telefonía es el FFR con factor 1 en el centro y 3 en los bordes como se muestra en la Figura 11. Esta es una ventaja de OFDM y se consigue gracias al hecho de dividir el espectro en subportadoras. Los recursos de frecuencia pueden ser utilizados completamente en cada región interior ya que los usuarios de las regiones interiores no experimentan la mayor parte de la interferencia. Los usuarios localizados en las zonas próximas a sus estaciones base servidoras hacen reuso completo, mientras que los usuarios de los bordes de las celdas hacen un uso exclusivo de las portadoras restantes, pero utilizando reuso 3. En base a esta utilización eficiente del espectro de frecuencias disponible, FFR puede disminuir la interferencia y aumentar la capacidad del sistema.

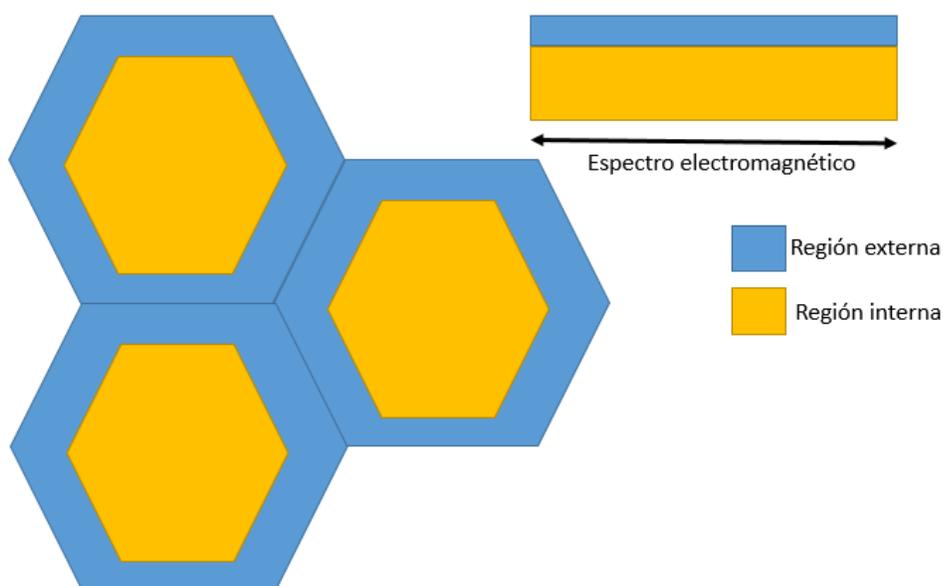
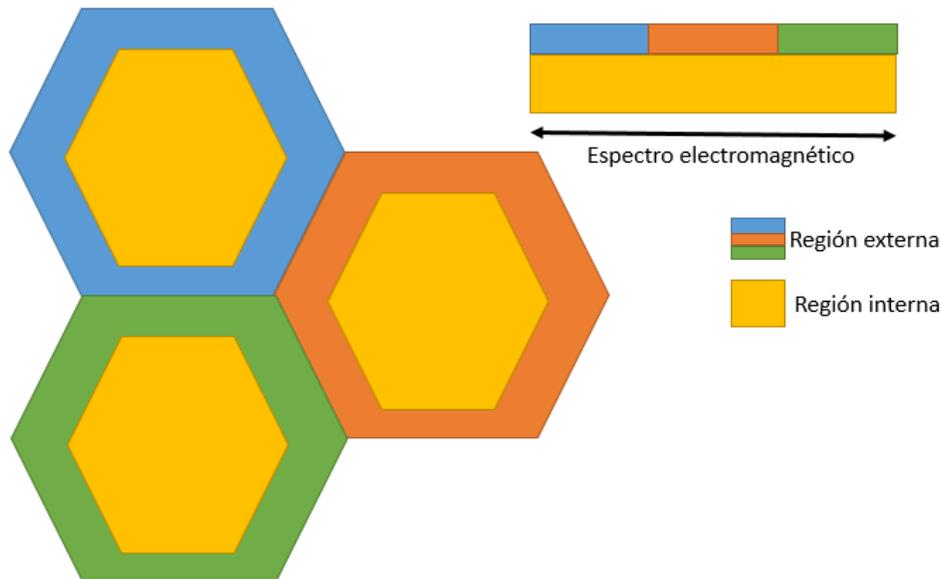


Figura 10.- Reutilización de Frecuencia Fraccional con factor de reuso 1**Fuente: Elaboración propia**

Es importante aclarar que al utilizar este esquema para el control de ICIC implica la necesidad de clasificar a los usuarios, la forma en que se hace esta clasificación no es parte de las especificaciones de LTE, quedando abierto para su ajuste de acuerdo a las necesidades del operador.

Por lo general únicamente se divide el área de la celda quedando la región interior y la región exterior. El porcentaje de portadores varía generalmente de 10 a 30%, sin embargo, algunos operadores utilizan el 50% para cada región. Esto puede variar de acuerdo a la características y condiciones de la red.

**Figura 11.- Reutilización de Frecuencia Fraccional con factor de reuso 1 en el centro y 3 en los bordes****Fuente: Elaboración propia**

Sectorización frecuencial

El esquema FRR puede clasificarse en sectorización frecuencial que consiste en dividir el ancho de banda disponible en tantas sub-bandas como sectores tiene la celda y cada sector asigna a los usuarios de su área los recursos de una de estas sub-bandas.

Se usan antenas directivas con un diagrama de radiación en el plano horizontal que cubre sólo un segmento angular, es lo que se conoce como antena sectorizada. Lo más común es utilizar 3 sectores de 120° cada uno, o 4 sectores de 90° como se muestra en la Figura 12, depende de la planificación y del ambiente de propagación [22].

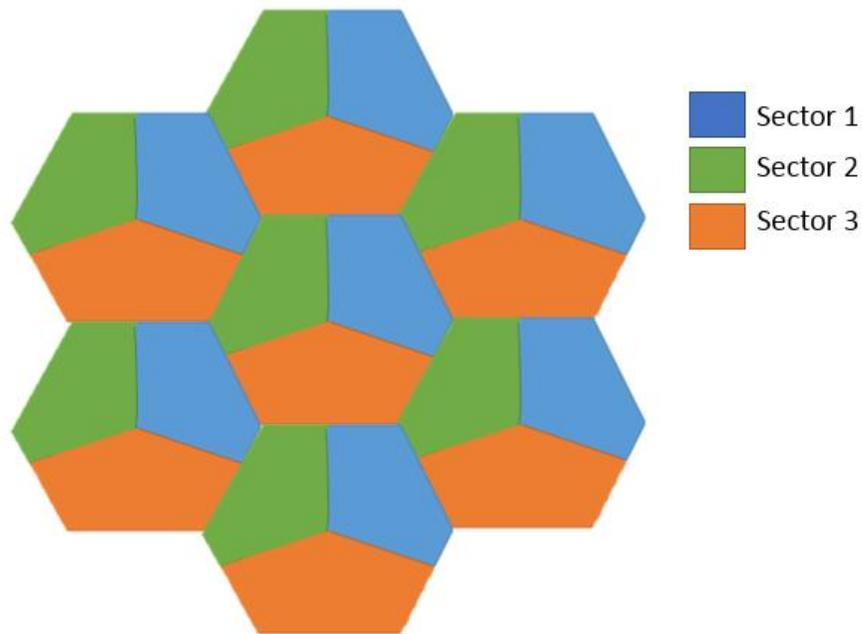


Figura 12.- Reutilización de Frecuencia sectorizado
Fuente: Elaboración propia

En la práctica lo más común es el despliegue de una red tri-sectorizada, por lo que la combinación de este tipo de red y el esquema fraccional mejora notablemente la calidad del servicio en las zonas de bordes.



Capítulo III. Control de potencia

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el funcionamiento y la importancia del control de potencia para la red LTE, hablando de los principales aspectos medioambientales, su impacto y ahorro de energía. Por último, se propone un modelo para el control de potencia basado en PLE que permita maximizar la capacidad de canal en un conjunto de celdas LTE utilizando el esquema de reutilización de frecuencia fraccional.

3.2 Aspectos medioambientales del control de potencia

Como se ha mencionado la utilización del control de potencia en las redes celulares permite la reducción de interferencia, además de reducir la potencia máxima de las antenas, siendo parte fundamental de los mecanismos de gestión de recursos RRM en LTE [25].

El principal impacto ambiental es el efecto que ejercen sobre la potencia media de emisión de las instalaciones radioeléctricas [9], es regulada por organismos internacionales y nacionales. En México el IFT es el encargado de establecer la potencia máxima permitida para que se opere una estación radioeléctrica, esta se especifica por la Secretaría en la autorización de la estación.

El parámetro principal que es utilizado para marcar los niveles máximos de exposición a las emisiones radioeléctricas es la Tasa Específica de Absorción TAE, que se relaciona con la energía absorbida por el cuerpo humano. La normativa establece una relación entre la TAE y el nivel de densidad de potencia del campo electromagnético, fijando unos límites máximos para los valores de TAE unas 50 veces inferiores a los considerados sin riesgo [9].

Otro impacto medioambiental del control de potencia es que es posible tener ahorro en el consumo medio de energía de los equipos, tanto en los equipos



transmisores ubicados en las estaciones base como en los dispositivos móviles de usuario.

Actualmente el uso de dispositivos móviles que soportan servicios de conectividad a internet en banda ancha es mayor, las altas velocidades a las que se produce la transmisión o recepción de datos mediante un dispositivo móvil requiere un consumo mayor de potencia que puede ser traducido a un agotamiento más rápido de la batería

Las tecnologías 4G desarrollan mecanismos de ahorro de energía que permiten operar a los terminales durante largos periodos de tiempo, sin tener que recargar. Entre ellos podemos encontrar el modo de Reposo o Idle, el modo de Recepción Discontinua y el control de la potencia transmitida de cada sector [9].

3.3 Control de Potencia en redes LTE

En los sistemas basados en OFDMA, donde la ortogonalidad entre subportadoras elimina la interferencia interna que pueda producirse en las, la función de control de potencia permite fijar la potencia de transmisión de los canales físicos para cada terminal conectado a la red, con el fin de asegurar que la información se reciba con un cierto nivel de SINR y de mitigar, en la medida de lo posible, las interferencias con otras celdas vecinas.

Concretamente, el control de potencia se encuentra relacionado con los procesos de sondeo del canal, reparto de recursos y adaptación del enlace. El primero de ellos tiene como objetivo llevar a cabo una estimación de la calidad del canal (en términos de SINR) que experimenta un usuario, tanto en el sentido ascendente como descendente. Para ello se emplean una serie de señales de referencia o pilotos intercambiadas entre el terminal y la estación base. Esa información es utilizada posteriormente durante el proceso de planificación de paquetes y reparto de recursos a los usuarios a los que se asignará un cierto número de bloques de recursos para transmitir sus datos en cada subtrama de 1 ms. El formato en que se envía la información (tipo de modulación, tasa de codificación, etc., depende de



los procesos de adaptación del enlace, que también se encargan de controlar que se fije una potencia de transmisión adecuada en el terminal móvil [9].

La estimación de las pérdidas de propagación que realiza el terminal móvil a partir de los pilotos enviados por la estación base, constituye la base para el control de potencia en lazo abierto. Mediante este mecanismo, el propio terminal es capaz de obtener una referencia según la cual ajustar su potencia de transmisión. Este proceso tiene la ventaja de ser bastante rápido, al no esperar ningún tipo de realimentación por parte de la estación base. Sin embargo, aunque los valores de las pérdidas de propagación y el desvanecimiento lento pueden considerarse prácticamente iguales para los enlaces ascendente y descendente, no se tiene en cuenta correctamente el efecto del desvanecimiento rápido. Por otro lado, el terminal puede recibir una serie de comandos procedentes de la estación base que le permitan corregir errores en la estimación del canal y adecuar su potencia de transmisión a las condiciones del mismo. A este procedimiento se le conoce como control de potencia en lazo cerrado. El eNodo-B se encarga de determinar el valor del ajuste necesario para lograr un cierto valor de potencia recibida o SINR a la entrada del receptor, que asegurará una probabilidad de error en la decodificación de la información dentro de los límites tolerados. Este proceso cuenta con una precisión mayor que el anterior, pero obliga al terminal a esperar la llegada de los comandos desde la estación base. Las técnicas de control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado ya fueron definidas en otros sistemas de comunicaciones móviles anteriores a LTE, como por ejemplo UMTS. La evolución y el aumento de complejidad de los mismos, buscando siempre una mayor eficiencia en el funcionamiento de la red, han conducido a que en los sistemas LTE actuales se utilice una combinación de ambos métodos, como veremos más adelante.

3.4 Control de potencia en el enlace descendente

El control de potencia en el enlace descendente es regulado por la estación base, de acuerdo al modelo de la antena de cada sector es el valor de la potencia de transmisión máxima y mínima. Como el consumo de potencia no es un factor

crítico del eNodoB es común que la potencia para la transmisión se distribuya uniformemente entre todos los RBs, asumiendo que la capacidad de canal es alta como para ocupar todo el ancho de banda. Todos los esquemas dirigidos al control de potencia para el enlace descendente están directamente ligados al control de la potencia de transmisión de la radio base y al esquema de coordinación de interferencia, basados principalmente en la maximización de la capacidad de canal, de acuerdo a la información con la que se cuente, en general los problemas de optimización se plantean a partir de las pérdidas por propagación del enlace, o como se propone en este trabajo a partir de la matriz de interferencia co-canal.

3.5 Modelo de optimización para el control de potencia

De acuerdo a la problemática que se tiene con los esquemas de reutilización de frecuencia planteados por el 3GPP y siguiendo los procesos de optimización para la gestión del espectro electromagnético definidos por el área de RRM en LTE, se plantea un modelo matemático basado en PLE que permita la optimización de la técnica de reutilización de frecuencia fraccional, específicamente la maximización de la capacidad de canal de todo el conjunto de celdas que conformen el sistema.

El modelo planteado busca maximizar la capacidad de canal considerando que se tienen múltiples enlaces interferentes además del enlace ideal como se muestra en la Figura 13. Se considera una red en donde todos los pares están operando en la misma banda de frecuencia creando interferencia co-canal.

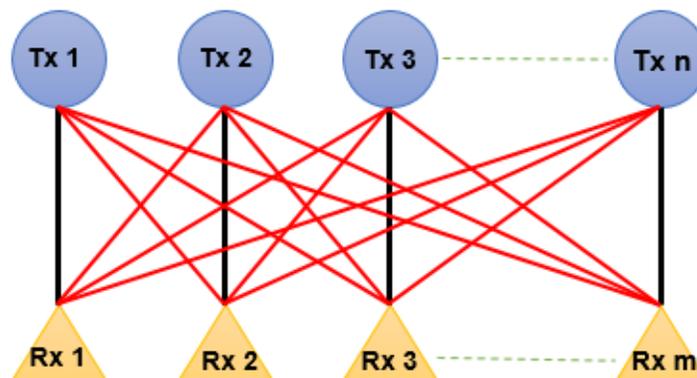


Figura 13.- Esquema de interferencias
Fuente: Elaboración propia

La Figura 13 representa la señal ideal y las señales interferentes que afectan a cada enlace. El esquema que se utiliza es el esquema de reutilización fraccional sectorizado, en la Figura 14 se muestra la distribución del espectro electromagnético por cada celda, se puede apreciar que con esta configuración idealmente se elimina por completo la interferencia, sin embargo en la práctica no se tienen las celdas a una misma distancia, y tampoco el área de cobertura de cada sector es delimitada por un hexágono, por lo tanto la distancia de separación de cada radio base, así como las condiciones de terreno, pérdidas por propagación y potencia de cada sector son los factores que definirán la eficiencia del esquema.

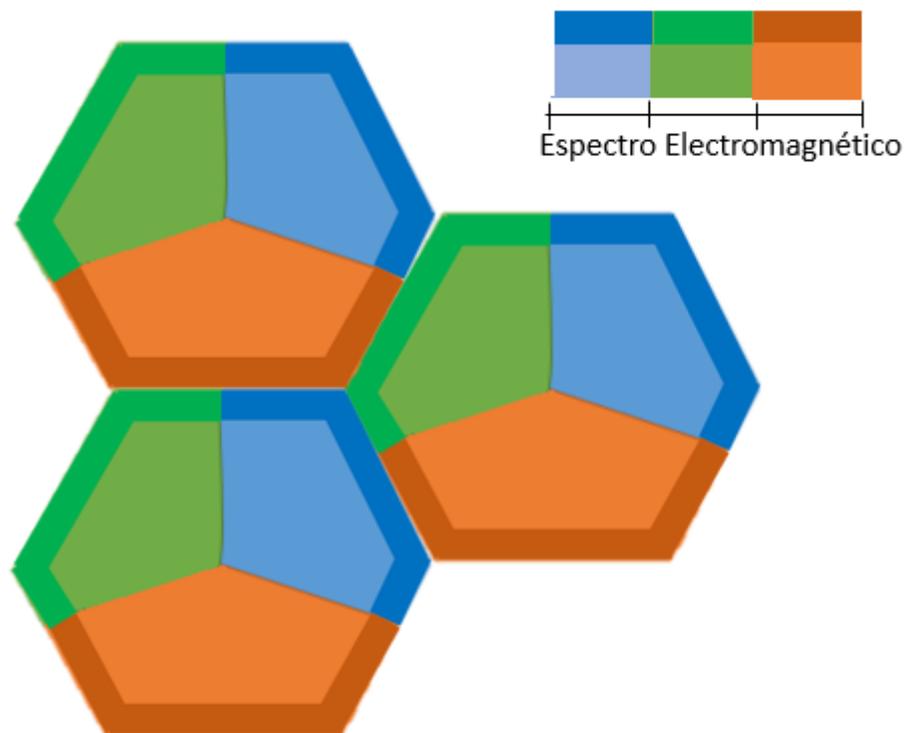


Figura 14. Configuración de Reutilización de Frecuencia Fraccional Sectorizado
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura 14 los sectores transmisores y su área de cobertura es el enlace ideal, las interferencias son los sectores de otras estaciones base que estén trabajando sobre el mismo rango de frecuencias y sobre la misma área.

Para definir el modelo de optimización se parte con la premisa de que cada Tx puede variar adaptativamente su potencia de transmisión en función de las decisiones de asignación de potencia, en este caso la asignación de potencia será fija basada en la matriz de interferencia obtenida a partir de la simulación del sistema en Mentum Planet.

Cabe destacar que Mentum Planet es una sofisticada solución de software basada en Windows y MapInfo, que apoya las tareas de evaluación, administración y optimización del desempeño de cobertura y capacidad de redes inalámbricas y móviles, soportando distintas tecnologías como LTE. La versión con la que se cuenta nos permite saber el nivel de interferencia co-canal promedio de cada sector y el sector interferente, a partir de ello la capacidad de canal se plantea en función de la SIR que es posible obtener mediante los valores de interferencia co-canal. [43]

Función Objetivo

La ecuación 6 representa la función objetivo, en donde C es la capacidad de canal de nuestro sistema. Esta capacidad de canal es el teorema de Shannon y esta expresado en la ecuación 2 en el capítulo I. Esta función tiene como variables los valores de potencia de cada sector.

$$\max_{P_1, P_2, \dots, P_N} C(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (6)$$

Ahora bien, se sustituye la ecuación 2 en la ecuación 6, quedando expresada nuestra función objetivo en 7.

$$\max C(P_1, P_2 \dots P_N) = \max \sum_{i=1}^N C_i(P_1, P_2, \dots, P_N) = \max \sum_{i=1}^N \log(1 + SIR) \quad (7)$$

Recordemos que la SIR en una relación entre el nivel de la señal útil de información y las interferencias. La herramienta de análisis que se utiliza nos genera una matriz de interferencias co-canal, es por eso que el valor de la SIR



será expresado en función de esta como se muestra en el capítulo I ecuación 1. Quedando nuestra función objetivo final expresada en la ecuación 8.

$$\max C(P_1, P_2 \dots P_N) = \sum_{i=1}^N C_i(P_1, P_2, \dots, P_N) = \sum_{i=1}^N \log \left(1 + \frac{P_i}{\frac{\sum_{i=1}^n I_i + \sigma}{SIR\ eff}} \right) \tag{8}$$

Restricciones

Las restricciones para la función objetivo es el nivel de potencia de cada transmisor, este nivel de potencia está establecido por norma con un máximo de 47 dB. Queda expresado en la ecuación (9) y (10)

$$P_i \leq P_{max} \tag{9}$$

$$P_{max} = 47\ dB \tag{10}$$

En la Tabla 3 se muestra el resumen de las variables y constantes de nuestro modelo matemático.

Tabla 3 Descripción de variables del modelo de optimización
Fuente: Elaboración propia

Elemento	Descripción
C	Capacidad de canal de Shannon
P	Nivel de potencia en dB
I	Nivel de interferencia co-canal en dB
i	Numero de antena
SIR eff	0.9
σ	AWGN
Pmax	Potencia máxima de operación de la antena



Capítulo IV Pruebas y Resultados

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el escenario de evaluación, así mismo se da una breve explicación de la configuración general de las celdas. Posterior a ello se plantea la solución del modelo de optimización planteado en el subtema 3.5 de acuerdo a la estructura del agrupamiento de celdas, por último, se presentan los análisis e histogramas de cobertura, nivel de C/I y modulaciones de tres escenarios el primero con la configuración de reutilización convencional, el segundo aplicando el esquema de reutilización de frecuencia fraccional y el tercero haciendo uso del modelo de optimización. Esto con el fin de visualizar el impacto que tiene el control de potencia en los esquemas de reutilización de frecuencia.

4.2 Escenario de Evaluación

Se eligen 4 ubicaciones, estas ubicaciones actualmente cuentan con una torre por lo que se descarta el costo de construcción de estas. La ubicación de cada radio base se muestra en la Tabla 4.

TABLA 4.- Ubicación de las estaciones base
Fuente: Elaboración Propia

Sitio	Latitud	Longitud
CHOPO	19.494264	-99.133797
HSBC	19.503706	-99.127922

TORRES LINDAVISTA	19.505692	-99.142536
ENCB	19.499639	-99.146314

El espectro radioeléctrico utilizado es la banda de frecuencia de 755 a 795 MHz, para 6 canales de 10 MHz, la asignación de los canales para cada sector se realiza de tal forma que los sectores de cada estación base tienen canales discontinuos, para poder eliminar la interferencia adyacente como se muestra en la Figura 15.

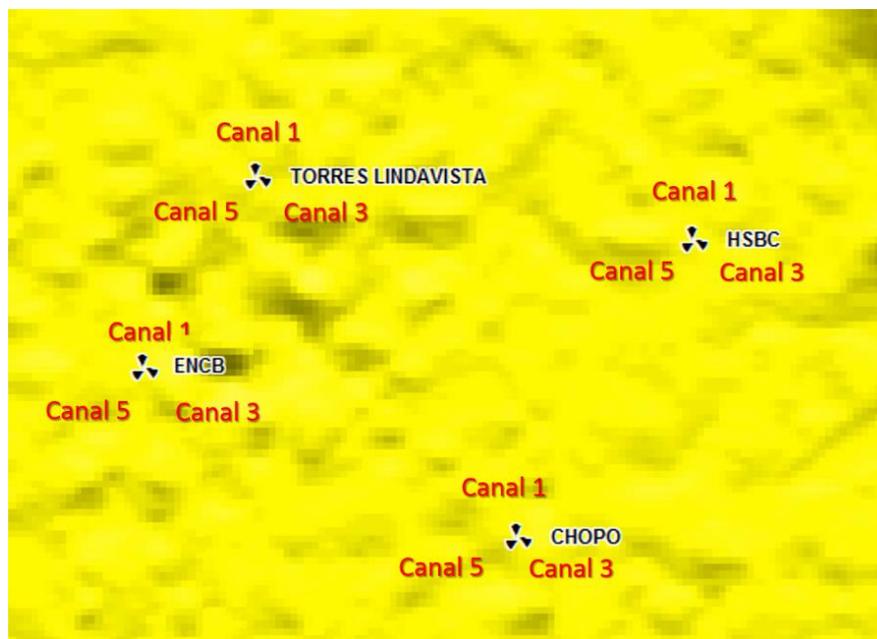


Figura 15.- Asignación de canal por sector
Fuente: Elaboración propia

La altura sobre el nivel del mar es aproximadamente de 2200 metros, además de contar con tres clasificaciones: zona comercial, industrial y residencial. Estas clasificaciones definen las condiciones para poder tener resultados más reales en los análisis de simulación.

4.2.1 Configuración de la Red

Una vez colocada cada radio base en las ubicaciones establecidas en la Tabla 3 se realiza la configuración del espectro radio eléctrico como se muestra en la Figura 16.

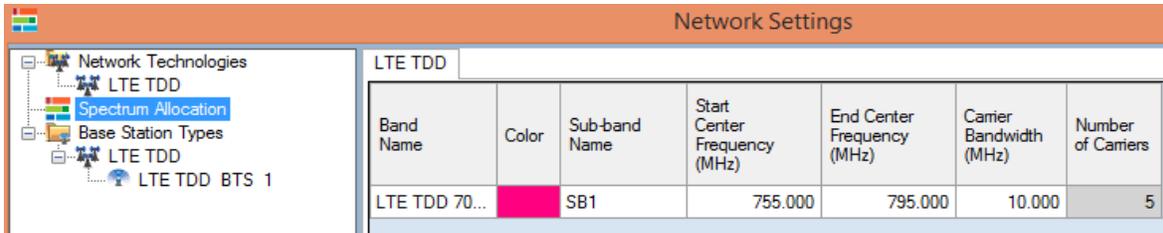


Figura 16. Configuración de banda de frecuencia

La antena que se utiliza es la antena DPV090X14C200 establecida en el programa mentum planet, al configurarla en el puerto 1 trabaja en la banda de 751 a 955 MHz, su diagrama de radiación se muestra en la Figura 17 y para este proyecto las potencias de transmisión varían de 30 a 47 dBm

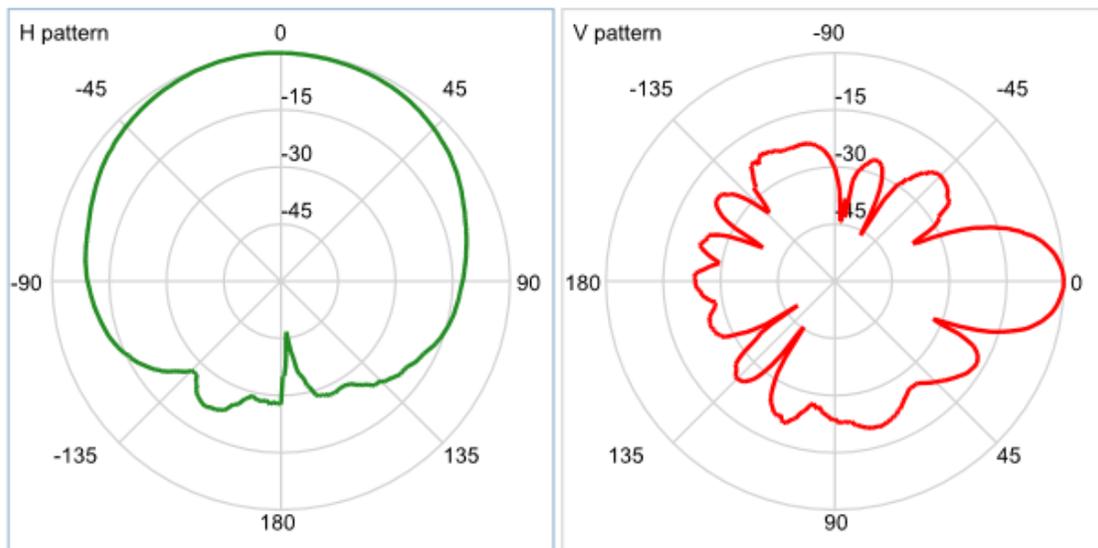


Figura 17. Diagrama de radiación de la antena DPV090X14C200

Fuente: [26]

Como puede apreciarse en la Figura 17, la antena con la que se está trabajando no es directiva, lo que genera mayor interferencia co-canal. Se utiliza además el esquema de calendarización predefinido por mentum planet. Como se había ya comentado la plataforma tiene la capacidad de generar una matriz de interferencia co-canal para cada sector. En la sección de *Project Explorer*, subsección *RF Tools* es posible generarla para en enlace de descarga como se muestra en la Figura 18.

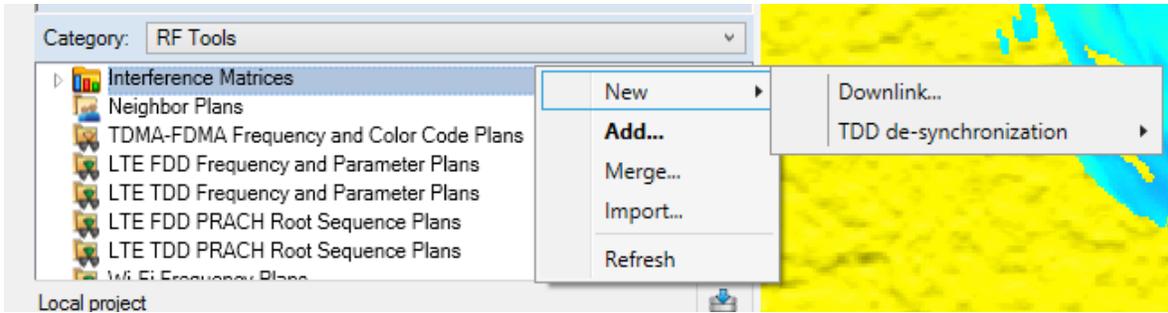


Figura 18. Generación de la matriz de interferencia
Fuente: Elaboración propia

Al generar la matriz de interferencia podemos realizar un cálculo estadístico del nivel de relación C/I que tiene cada sector por área.

El modelo de optimización planteado en el capítulo anterior requiere para su solución los valores de ganancia de canal, esta ganancia de canal es calculada a partir de la división de la relación C/I de cada sector con la relación C/I considerando que no existe ningún enlace interferente

En el Anexo se muestra la tabla de Excel que nos proporciona el programa, en ella se puede observar el número de kilómetros cuadrados que están afectados por cada valor de interferencia, además de darnos el valor promedio de nivel C/I y la ganancia de canal.

4.3 Solución del modelo de optimización

El sistema de 4 celdas planteado cuenta con 3 sectores cada una, separados con 20 grados de diferencia, por lo tanto, la suma de la ecuación 7 va de $i=1$ hasta 12. Como se muestra en la ecuación 8. Para la restricción de la ecuación 9 se establece por norma que la potencia máxima que pueden tomar los transmisores es de 47 dB.

$$\max C(P_1, P_2 \dots P_N) = \sum_{i=1}^{12} P_i(P_1, P_2, \dots, P_N) = \sum_{i=1}^{12} \log \left(1 + \frac{P_i}{\frac{\sum_{i=1}^n I_i + \sigma}{SIR \text{ eff}}} \right) \quad (8)$$

$$P_i \leq 47 \text{ dB} \quad (9)$$



La solución del modelo está basada en la información obtenida del análisis aplicando el esquema de reutilización fraccional. El nivel de interferencia co-canal de cada sector se muestra en la Tabla 5.

En la columna suma se muestra la suma de todas las interferencias que afectan al sitio interferido. Esa suma se sustituye en la variable I.

Tabla 5 Matriz de Interferencia co-canal aplicando el esquema de reutilización fraccional
Fuente: Elaboración propia

Sitio Interferido	Sector	Sitio Interferente	Sector	% de Área afectada	Valor Promedio co-canal	Suma
CHOPO	1					
CHOPO	1	HSBC	3	0.5848455	0.88471	
CHOPO	1	CHOPO	3	0.3413798	33.10298	
CHOPO	1	TORRES LINDAVISTA	2	0.3925874	33.19878	
CHOPO	1	CHOPO	2	0.3393199	35.79919	
CHOPO	1	ENCB	2	0.3243557	30.81066	
CHOPO	1	HSBC	2	0.09418459	15.24935	
CHOPO	1	TORRES LINDAVISTA	3	0.06597924	18.46204	
CHOPO	1	ENCB	1	0.04432964	21.0772	
CHOPO	1	HSBC	1	0.05430581	14.51867	
CHOPO	1	TORRES LINDAVISTA	1	0.01837693	5.05246	
CHOPO	1	ENCB	3	0.009063398	3.97715	212.13319
CHOPO	2					
CHOPO	2	CHOPO	3	0.3609915	35.02285	
CHOPO	2	CHOPO	1	0.3209753	36.41407	
CHOPO	2	HSBC	3	0.1978054	37.27076	
CHOPO	2	ENCB	2	0.06325451	31.33768	
CHOPO	2	TORRES LINDAVISTA	2	0.0598527	32.13923	
CHOPO	2	HSBC	2	0.1463032	32.85701	



CHOPO	2	TORRES LINDAVISTA	3	0.000595739	4.0369	
CHOPO	2	HSBC	1	0.001786816	5.66883	
CHOPO	2	ENCB	3	0.001457883	3.74179	
CHOPO	2	ENCB	1	0	1.30984	219.79896
CHOPO	3					
CHOPO	3	ENCB	2	0.3957756	34.60963	
CHOPO	3	CHOPO	2	0.3272597	36.02937	
CHOPO	3	CHOPO	1	0.3571192	36.32671	
CHOPO	3	HSBC	3	0.1274812	31.04391	
CHOPO	3	TORRES LINDAVISTA	2	0.09836024	22.56323	
CHOPO	3	TORRES LINDAVISTA	3	0.05866859	27.65164	
CHOPO	3	ENCB	3	0.07496365	20.65344	
CHOPO	3	HSBC	2	0.00651274	5.06935	
CHOPO	3	ENCB	1	0.006520203	8.76244	
CHOPO	3	HSBC	1	5.40E-05	7.62242	
CHOPO	3	TORRES LINDAVISTA	1	0	5.90607	236.23821
ENCB	1					
ENCB	1	TORRES LINDAVISTA	3	0.7626061	5.407469	
ENCB	1	ENCB	3	0.4409927	13.49764	
ENCB	1	ENCB	2	0.2346281	19.39903	
ENCB	1	TORRES LINDAVISTA	1	0.2304292	28.47826	
ENCB	1	CHOPO	1	0.03158408	25.5451	
ENCB	1	TORRES LINDAVISTA	2	0.08349984	25.98259	
ENCB	1	HSBC	3	0.01893407	26.389	
ENCB	1	CHOPO	3	0.008666349	30.66183	
ENCB	1	HSBC	1	0.01279169	0.17653	175.537449
ENCB	2					
ENCB	2	TORRES LINDAVISTA	3	0.3691863	14.0351	
ENCB	2	ENCB	3	0.4249976	14.03833	
ENCB	2	TORRES LINDAVISTA	2	0.3354819	16.56127	
ENCB	2	CHOPO	3	0.3495343	16.89425	



ENCB	2	ENCB	1	0.2711141	18.595	
ENCB	2	CHOPO	1	0.2632444	18.9504	
ENCB	2	HSBC	3	0.1839988	21.89574	
ENCB	2	HSBC	1	0.004411709	44.4665	
ENCB	2	CHOPO	2	0.01991814	45.17222	
ENCB	2	TORRES LINDAVISTA	1	0.001386378	45.73122	
ENCB	2	HSBC	2	0.000174544	48.33935	304.67938
ENCB	3					
ENCB	3	TORRES LINDAVISTA	3	0.3918204	13.73181	
ENCB	3	ENCB	1	0.3556906	16.01587	
ENCB	3	ENCB	2	0.3186041	16.26827	
ENCB	3	CHOPO	3	0.09250883	22.42915	
ENCB	3	HSBC	3	0.01550872	26.06436	
ENCB	3	CHOPO	1	0.02154095	28.48236	
ENCB	3	TORRES LINDAVISTA	2	0.01759855	29.86901	
ENCB	3	TORRES LINDAVISTA	1	0.01217076	43.91641	
ENCB	3	CHOPO	2	0.000553643	48.8462	245.62344
HSBC	1					
HSBC	1	HSBC	2	0.3665959	15.80888	
HSBC	1	HSBC	3	0.3139043	16.48562	
HSBC	1	TORRES LINDAVISTA	2	0.1783879	18.50638	
HSBC	1	CHOPO	1	0.1558157	18.79645	
HSBC	1	ENCB	2	0.02379302	26.43241	
HSBC	1	TORRES LINDAVISTA	1	0.05886403	28.95191	
HSBC	1	CHOPO	2	0.006456479	31.79898	
HSBC	1	ENCB	1	0.01863176	32.89365	
HSBC	1	CHOPO	3	0.000200816	48.37624	
HSBC	1	TORRES LINDAVISTA	3	0.000255571	48.46502	286.51554
HSBC	2					
HSBC	2	HSBC	3	0.3562103	16.2574	
HSBC	2	HSBC	1	0.3264907	16.34513	
HSBC	2	CHOPO	1	0.1493404	18.31337	



HSBC	2	CHOPO	2	0.1579486	20.63483	
HSBC	2	TORRES LINDAVISTA	2	0.06864125	21.02223	
HSBC	2	ENCB	2	0.02690432	25.43824	
HSBC	2	TORRES LINDAVISTA	1	0.001964828	46.88023	
HSBC	2	ENCB	1	0.000798241	47.64599	
HSBC	2	CHOPO	3	0.00082559	48.4593	
HSBC	2	TORRES LINDAVISTA	3	0	48.90422	1.08912423
HSBC	3					
HSBC	3	CHOPO	1	0.5950866	10.86703	
HSBC	3	TORRES LINDAVISTA	2	0.3916538	14.86307	
HSBC	3	HSBC	1	0.3901066	14.90087	
HSBC	3	HSBC	2	0.3224431	16.26355	
HSBC	3	ENCB	2	0.1588089	20.97911	
HSBC	3	CHOPO	2	0.169648	22.25095	
HSBC	3	ENCB	1	0.04104495	31.99159	
HSBC	3	TORRES LINDAVISTA	1	0.04353726	34.91528	
HSBC	3	CHOPO	3	0.03323268	37.61089	
HSBC	3	TORRES LINDAVISTA	3	0.02173079	41.50882	
HSBC	3	ENCB	3	0.000313316	48.74617	309.90094
TORRES LINDAVISTA	1					
TORRES LINDAVISTA	1	ENCB	1	0.3524555	14.07209	
TORRES LINDAVISTA	1	TORRES LINDAVISTA	2	0.3588524	15.95748	
TORRES LINDAVISTA	1	TORRES LINDAVISTA	3	0.3094735	16.53505	
TORRES LINDAVISTA	1	CHOPO	1	0.04904205	23.57059	
TORRES LINDAVISTA	1	HSBC	3	0.04382827	24.64169	
TORRES LINDAVISTA	1	HSBC	1	0.06817286	26.77792	
TORRES LINDAVISTA	1	ENCB	2	0.009068978	26.92077	
TORRES LINDAVISTA	1	ENCB	3	0.01404763	43.74255	



TORRES LINDAVISTA	1	CHOPO	3	0.000154381	46.80827	
TORRES LINDAVISTA	1	HSBC	2	0.000182994	48.89037	
TORRES LINDAVISTA	1	CHOPO	2	4.25E-06	48.90589	336.82267
TORRES LINDAVISTA	2					
TORRES LINDAVISTA	2	TORRES LINDAVISTA	1	0.3697384	14.85476	
TORRES LINDAVISTA	2	CHOPO	1	0.3971286	15.70347	
TORRES LINDAVISTA	2	HSBC	3	0.3991647	15.79156	
TORRES LINDAVISTA	2	ENCB	1	0.1896897	16.0708	
TORRES LINDAVISTA	2	ENCB	2	0.2986305	16.23328	
TORRES LINDAVISTA	2	TORRES LINDAVISTA	3	0.3146174	17.46147	
TORRES LINDAVISTA	2	HSBC	1	0.191128	22.43886	
TORRES LINDAVISTA	2	CHOPO	3	0.05354589	31.26901	
TORRES LINDAVISTA	2	CHOPO	2	0.004291214	45.30867	
TORRES LINDAVISTA	2	ENCB	3	0.001340536	45.57792	
TORRES LINDAVISTA	2	HSBC	2	0.004893823	46.52358	287.23338
TORRES LINDAVISTA	3					
TORRES LINDAVISTA	3	ENCB	1	0.7755195	6.243708	
TORRES LINDAVISTA	3	TORRES LINDAVISTA	1	0.5093399	12.61228	
TORRES LINDAVISTA	3	TORRES LINDAVISTA	2	0.2462675	19.88721	
TORRES LINDAVISTA	3	ENCB	2	0.1487659	21.72004	
TORRES LINDAVISTA	3	ENCB	3	0.1942942	24.20262	
TORRES LINDAVISTA	3	CHOPO	1	0.03187861	24.65658	
TORRES LINDAVISTA	3	HSBC	3	0.02996993	25.29934	
TORRES LINDAVISTA	3	CHOPO	3	0.03214912	32.8039	



TORRES LINDAVISTA	3	HSBC	1	0.001420277	39.24712	
TORRES LINDAVISTA	3	CHOPO	2	2.32E-05	48.88569	
TORRES LINDAVISTA	3	HSBC	2	0	48.90548	304.463968

Para dar solución al modelo se utilizó la herramienta de optimización “optimtols” de MATLAB, función fmincon como se muestra a continuación.

```

%**** Programa Principal****
options = optimoptions(@fmincon,...
    'Display','iter','Algorithm','interior-point');
[x,fval] = fmincon(@rosenbrock,[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ],...
    [],[],[],[],[],[],@unitdisk,options)

%%
%**** Función Objetivo****
function f = rosenbrock(x)
I1= 212
I2=219
I3=236
I4=175
I5=304
I6=245
I7=286
I8=309
I9=294
I10=336
I11=287
I12=304
f= -log2(1+(x(1)/(I1*0.9)))-log2(1+(x(1)/(I2*0.9)))-
log2(1+(x(3)/(I3*0.9)))-log2(1+(x(4)/(I4*0.9)))-log2(1+(x(5)/(I5*0.9)))-
log2(1+(x(6)/(I6*0.9)))-log2(1+(x(7)/(I7*0.9)))-log2(1+(x(8)/(I8*0.9)))-
log2(1+(x(9)/(I9*0.9)))-log2(1+(x(10)/(I10*0.9)))-
log2(1+(x(11)/(I11*0.9)))-log2(1+(x(12)/(I12*0.9)));

%%
%**** Restricciones ****
function [c, ceq] = unitdisk(x)
c = [-x(1)+47;-x(2)+40;-x(3)+25;-x(4)+47;-x(5)+47;-x(6)+43;-x(7)+20;-
x(8)+47;-x(9)+47;-x(10)+47;-x(11)+47;-x(12)+47]
ceq = [ ];

```



Los valores de potencia que maximizan la capacidad del sistema que arroja la solución del modelo mediante el programa anterior se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de potencia obtenidas de la solución del modelo

Fuente: Elaboración propia

Sector	Valor de Potencia [dBm]
CHOPO 1	29
CHOPO 2	23
CHOPO 3	18
HSBC 1	27
HSBC 2	27
HSBC 3	25
TORRES LINDAVISTA 1	16
TORRES LINDAVISTA 2	27
TORRES LINDAVISTA 3	27
ENCB 1	27
ENCB 2	27
ENCB 3	27

En los siguientes puntos se realizan los análisis correspondientes de nivel de C/I, cobertura de descarga y modulaciones disponibles para cada radio base para 3 escenarios diferentes. Comenzando por el análisis de reutilización de frecuencia convencional, posterior el análisis aplicando el esquema de reutilización de frecuencia fraccional con factores de reuso 1 y 3 y por último el análisis aplicando el control de potencia al esquema FFR. Se realizan estos análisis con la finalidad



de mostrar la reducción de interferencia y mejora del canal descendente con cada esquema.

Además de la aplicación de los esquemas de reutilización de frecuencia se presentan los análisis anteriores aplicando la optimización para la asignación de canales que la herramienta Mentum Planet ofrece. Cabe señalar que la optimización que Mentum Planet realiza consiste en distribuir los canales disponibles en todos los sectores, de tal forma que se minimice la interferencia entre ellos.

4.4 Análisis 1. Reutilización de Frecuencia Convencional

La reutilización de frecuencia convencional consiste en la asignación de canales discontinuos a los sectores de cada estación base. La asignación es de forma discontinua con el fin de eliminar la interferencia adyacente.

4.4.1 Configuración de la red

Para realizar este análisis se distribuyen los canales de frecuencia como se muestra en la figura 13, esta configuración es la más común aplicada en la práctica. La potencia que se asigna a cada sector es de 45 dBm. Más detalles de la configuración de la red se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de la configuración de la red para el esquema de reutilización convencional

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Especificación
Antena	DPV090X14C200
Banda de operación	700 MHz
Ancho de banda total	50 MHz
Tamaño de canal	10 MHz
Altura del transmisor	25 m
Altura del receptor	1 m



Modelo de canal	EPA 5 km/h
Esquema de reutilización de frecuencia	Tradicional
Número de estaciones base	4

4.4.2 Análisis de nivel de C/I

El nivel de C/I es considerado bueno a partir de los 20 dB, por debajo de este nivel se dice que la señal recibida es de mala calidad y no es aceptada ya que se tendrían problemas en la recuperación de la información.

En la Figura 19, se muestra el análisis de nivel de C/I de todo el sistema, como se observa existe un área considerable con un nivel de C/I de 5 dB, el nivel de interferencia en la mayoría del área cubierta por los sectores presenta un nivel de interferencia elevado ocasionando que los usuarios de esa área queden sin servicio y si fuera el caso representa pérdidas económicas para la compañía a cargo. Como se mencionó en el capítulo 1 la principal causa de interferencia en un sistema de comunicaciones es debido a la interferencia que se genera por la reutilización de frecuencia.

En la Figura 20 puede apreciarse una gráfica del cálculo estadístico que realiza Mentum Planet del porcentaje de área en metros cuadrados de para los niveles de interferencia.

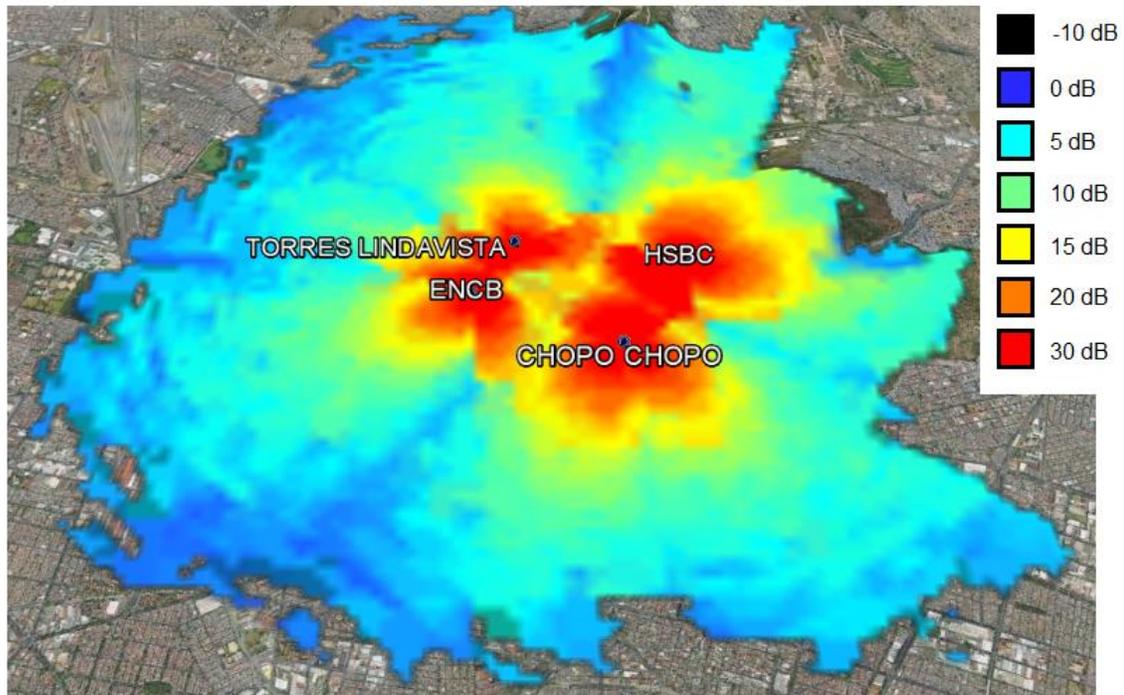


Figura 19.- Análisis de nivel de C/I del sistema para el esquema de reutilización tradicional
Fuente: Elaboración propia

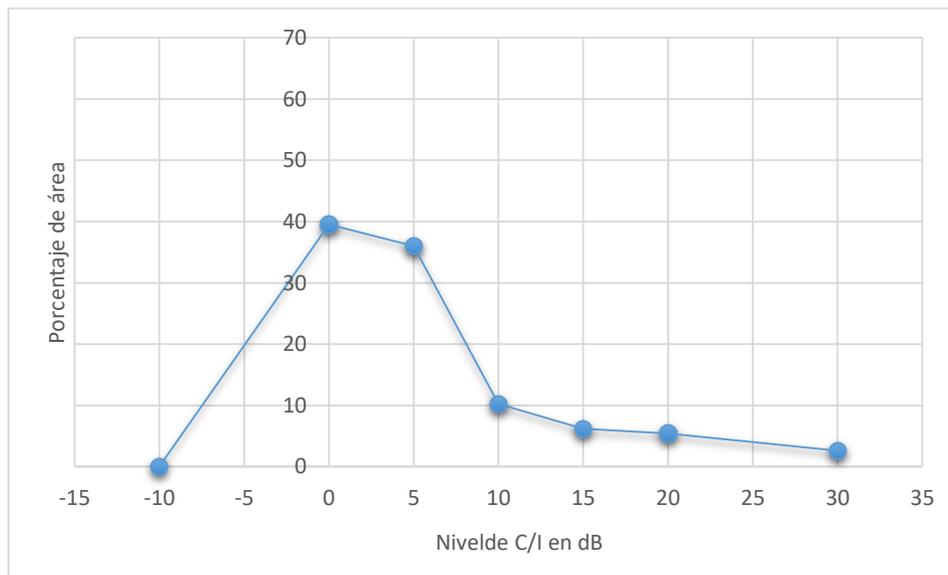


Figura 20.- Grafica del porcentaje de área para cada nivel de interferencia para el esquema de reutilización convencional
Fuente: Elaboración propia

De un total de 47.8 Km² que puede cubrir el conjunto de 12 sectores instalados solo el 24.5% tiene un nivel de C/I mayor a 10 dB.

4.2.3 Análisis de cobertura de descarga

Con los resultados del análisis de C/I se prevé que el enlace de descarga solo tendrá cobertura en las zonas mayores a 10 dB, sin embargo, el cálculo estadístico del análisis realizado que se muestra en la Figura 21 se observa que solo el 29.76% de toda el área que pueden cubrir las antenas de cada sector tienen cobertura de descarga como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Porcentaje de descarga para el esquema de reutilización tradicional

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Porcentaje de area cubierta
Con descarga	27.44 %
Sin descarga	47.80 %

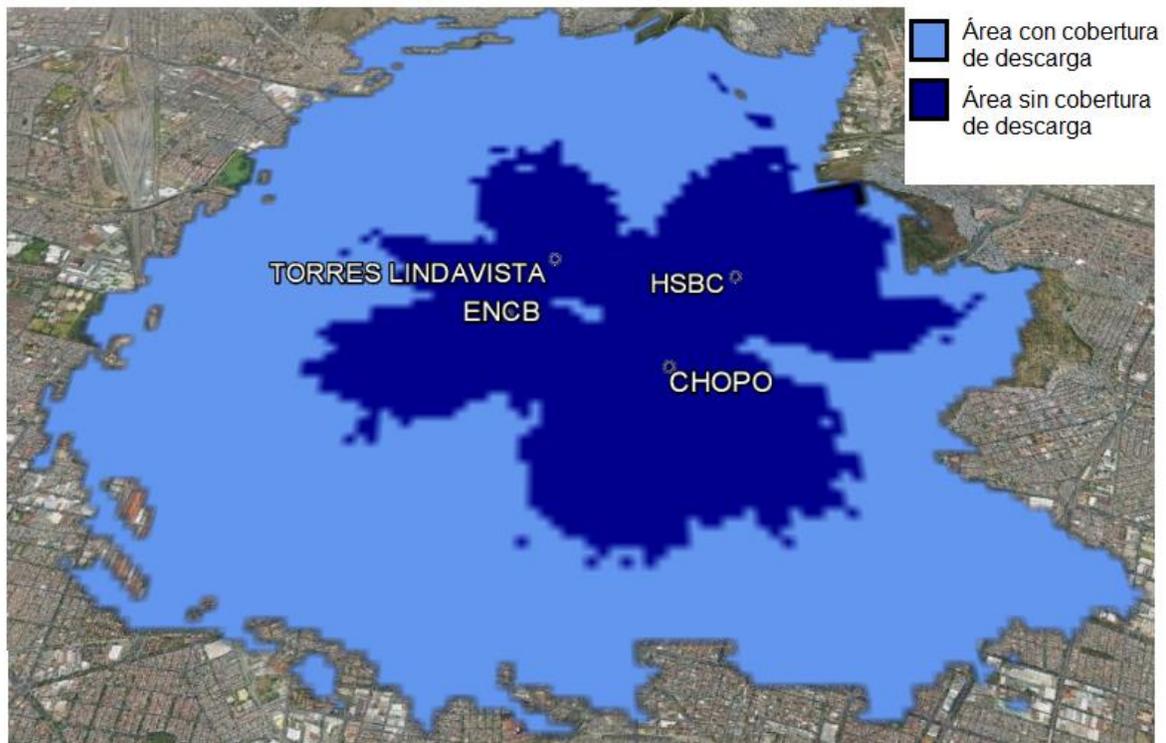


Figura 21. Análisis de cobertura de descarga para el esquema de reutilización de frecuencia convencional

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Análisis de Modulaciones

El análisis que nos permita verificar el tipo demodulación disponible es importante ya que el tipo de modulación asignada está ligada al nivel de recepción, cuanto mayor sea el nivel de recepción la modulación se aproximara a 64 QAM.

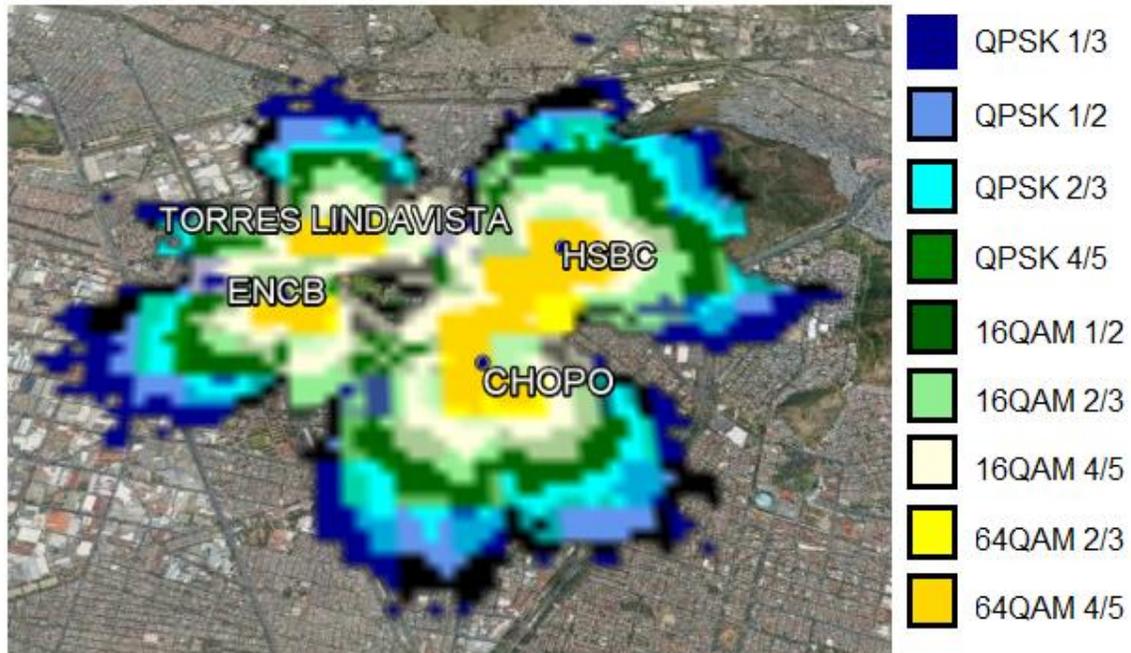


Figura 22.- Análisis de modulaciones para el esquema de reutilización de frecuencia convencional

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la Figura 22, el área cubierta por la modulación 64 QAM es reducida, las modulaciones dependen de la distancia del transmisor al punto de interés. En la Figura 23, se muestra la gráfica del porcentaje de área cubierta por cada modulación.

Se puede observar que para modulaciones altas el porcentaje de área es bajo, para una red LTE, en donde las tasas de transmisión son altas, un escenario como este no cumple con los requisitos de modulación.

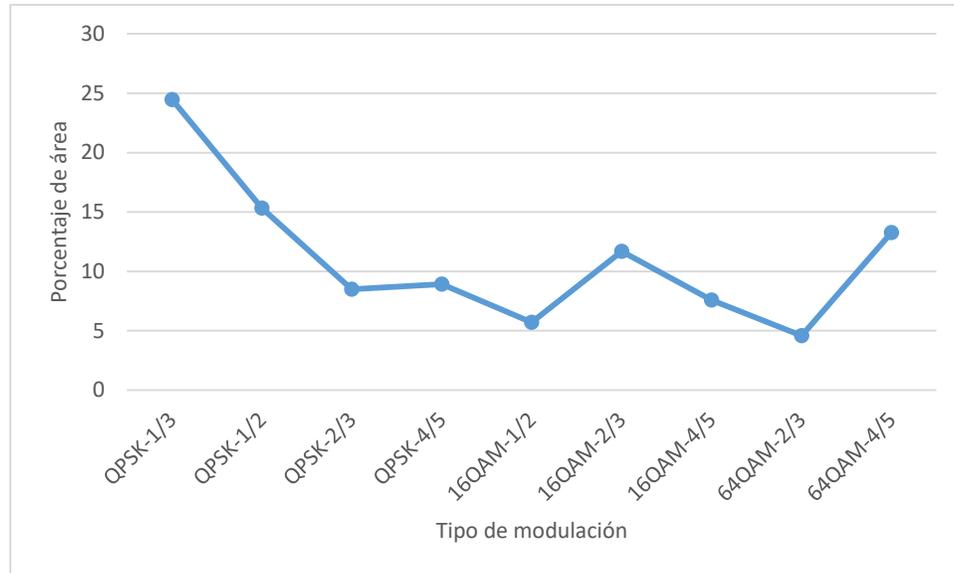


Figura 23.- Grafica del porcentaje de área cubierto para cada tipo de modulación disponible para el esquema de reutilización convencional.

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que existe una relación estrecha entre el nivel de C/I y la modulación asignada. Por lo general este nivel es establecido por el fabricante del transmisor, sin embargo, es posible tener un rango para cada modulación para LTE. Estos rangos se definen en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de área descarga para el esquema de reutilización fraccional

Fuente: Elaboración propia

Modulación	Nivel de C/I [Db]
QPSK – 1/3	6
QPSK – 1/2	8
QPSK – 2/3	11
QPSK – 4/5	13
16QAM – 1/2	15
16QAM – 2/3	18
16QAM – 4/5	21
64QAM – 2/3	24



4.5 Análisis 2. Reutilización de frecuencia fraccional con factor de reúso 1 al centro y 3 en bordes.

Para realizar este análisis, se configura en la plataforma MATLAB un esquema de reutilización de frecuencia para redes LTE sugerido por el 3GPP, el esquema ha sido explicado en el capítulo 3 y puede observarse gráficamente en la Figura 12.

4.5.1 Configuración de la red

La configuración de la red, es igual a la anterior, respetando los parámetros de la Tabla 5.

Cabe destacar que el software mentum planet asigna la región externa e interna de forma automática, basándose en el tamaño de canal y nivel de interferencia de cada sector.

4.5.2 Análisis de nivel de C/I

Los esquemas de reutilización de frecuencia están diseñados con el objetivo de mejorar los niveles de interferencia, específicamente en los bordes de esta. Sin embargo, en la práctica, como se había mencionado el uso de estos esquemas en celdas que no están ubicadas a la misma distancia genera problemas de interferencia. Como se observa en la Figura 24, el nivel de C/I aumenta 5 dB en los bordes de todas las celdas. Pero el nivel aun no es considerado bueno, aunque los canales fueron ubicados para evitar interferencia los sectores no están lo suficientemente alejados para no interferirse, podemos observar una mejora mínima del nivel de C/I.

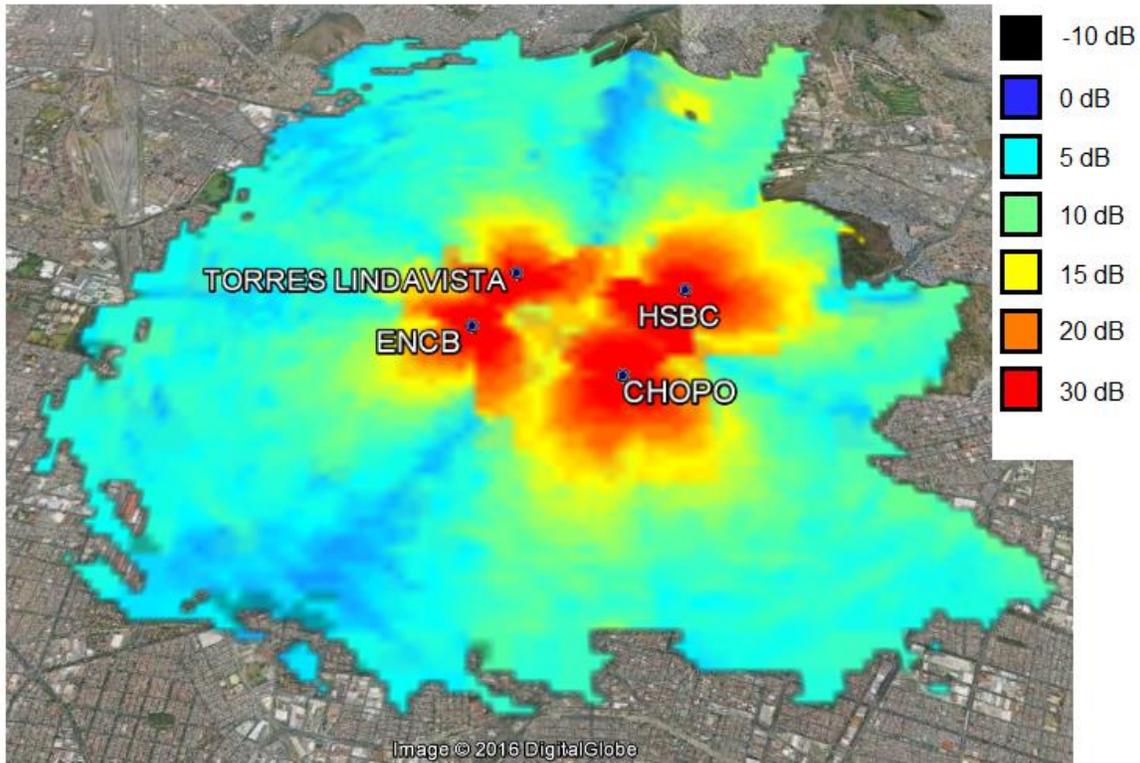


Figura 24.- Análisis de nivel de C/I del sistema para el esquema de reutilización tradicional
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 puede apreciarse una gráfica del cálculo estadístico que realiza Mentum Planet del porcentaje de área en metros cuadrados de para los niveles de interferencia de la Figura 23.

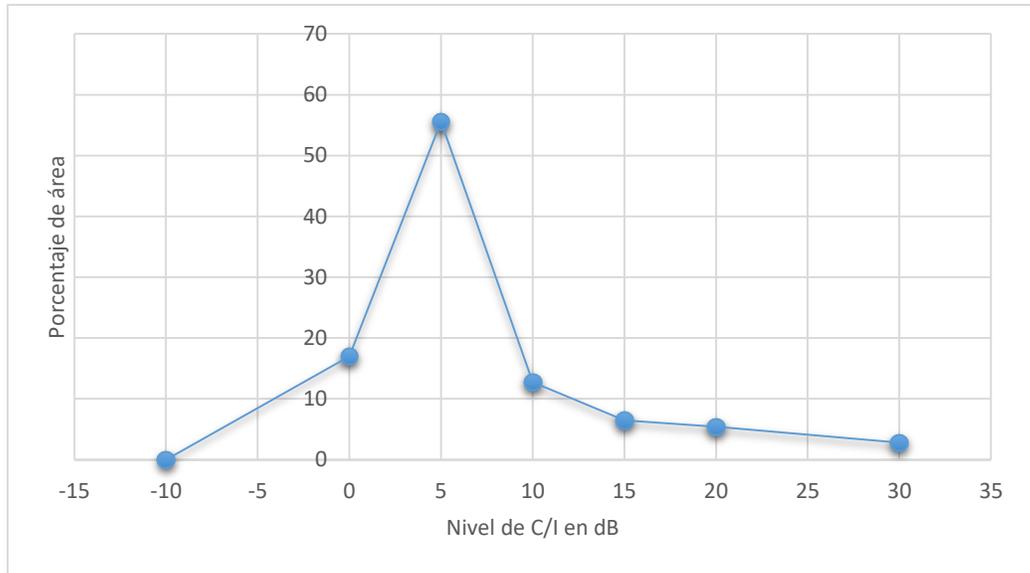


Figura 25.- Grafica del porcentaje de área para cada nivel de interferencia para el esquema de reutilización convencional
Fuente: Elaboración propia

De un total de 47.8 Km² que puede cubrir el conjunto de 12 sectores instalados solo el 27.44% tiene un nivel de C/I mayor a 10 dB. Mejoro apenas un 3%, porcentaje que es despreciable, el nivel de C/I en la mayor parte del sistema es menor a 10 dB.

4.5.3 Análisis de cobertura de descarga

Como en el escenario anterior los resultados del análisis de C/I se prevé que el enlace de descarga solo tendrá cobertura en las zonas mayores a 10 dB. E

El cálculo estadístico del análisis realizado que se muestra en la Figura 25 nos dice que solo el 31.58% de toda el área que pueden cubrir las antenas de cada sector tienen cobertura de descarga como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de área descarga para el esquema de reutilización fraccional
Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Porcentaje de área cubierto
Con descarga	31.58 %

Sin descarga

68.42 %

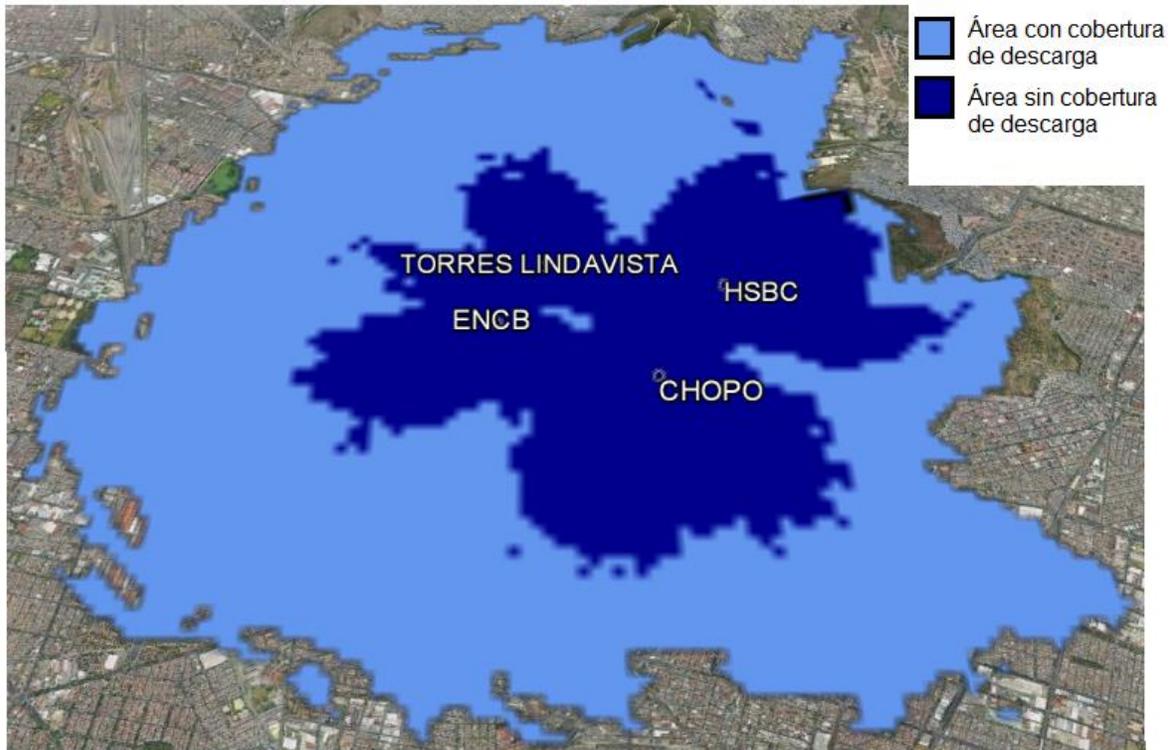


Figura 26. Análisis de cobertura de descarga para el esquema de reutilización de frecuencia convencional

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse, no existe diferencia considerable entre el análisis de la Figura 26 correspondiente al esquema fraccional y la Figura 20 correspondiente al esquema convencional.

La pregunta que surge después de esta comparación es porque la existencia de estos esquemas si realmente no dan solución al problema de la interferencia. La respuesta está en que el área de RRM establece que los esquemas de reutilización de frecuencia deben ser optimizados mediante control de potencia u otros métodos de acuerdo a las condiciones de la red. Estos esquemas teóricamente y en condiciones ideales eliminan la interferencia, pero en condiciones reales es necesario aplicar algún método de optimización, el más utilizado es el control de potencia.

4.5.4 Análisis de Modulaciones

Como el resultado del análisis de C/I no fue favorable, y la reducción de interferencia en comparación al esquema de reutilización de frecuencia tradicional las diferencias son mínimas, las modulaciones de igual forma no favorecen al sistema de celdas. La modulación más alta se concentra en el centro de las celdas, únicamente se observa un incremento en los sectores del CHOPO y HSBC esta mejora se ve reflejada en las estadísticas mostradas en la figura 27.

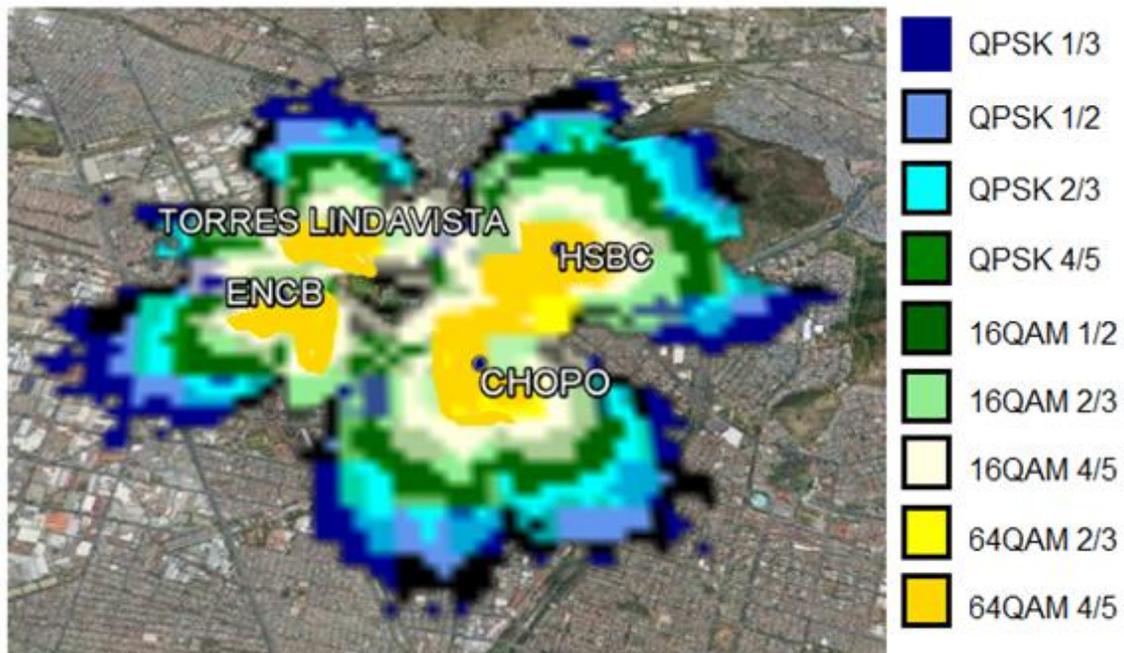


Figura 27.- Análisis de modulaciones para el esquema de reutilización de frecuencia convencional

Fuente: Elaboración propia

Podemos observar un ligero incremento del porcentaje en la modulación 64 QAM, debido a la separación de dos regiones, interna y externa. Sin embargo, las regiones externas permanecen con cambios despreciables a la vista.

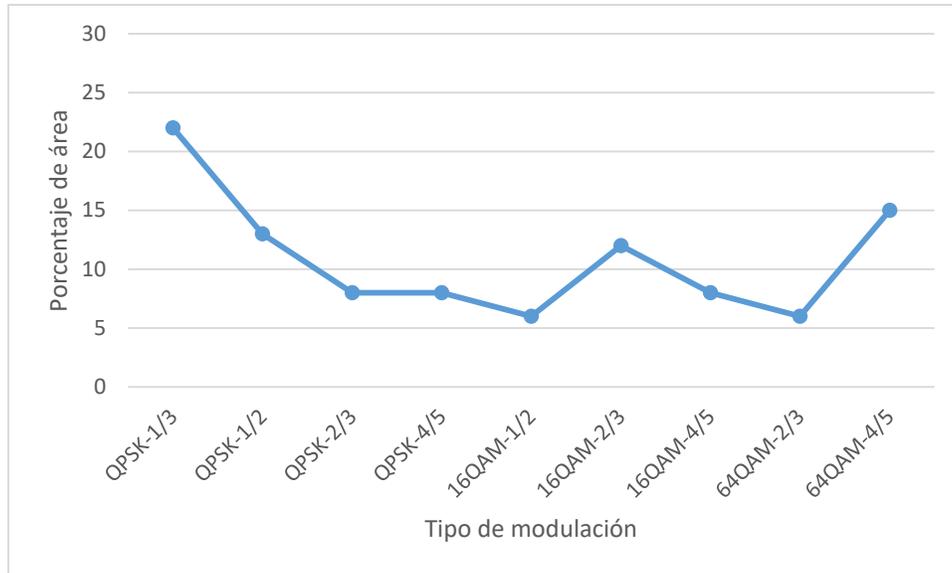


Figura 28.- Grafica del porcentaje de área cubierto para cada tipo de modulación disponible para el esquema de reutilización convencional.

Fuente: Elaboración propia

4.5.5 Regiones de esquema de reuso fraccional

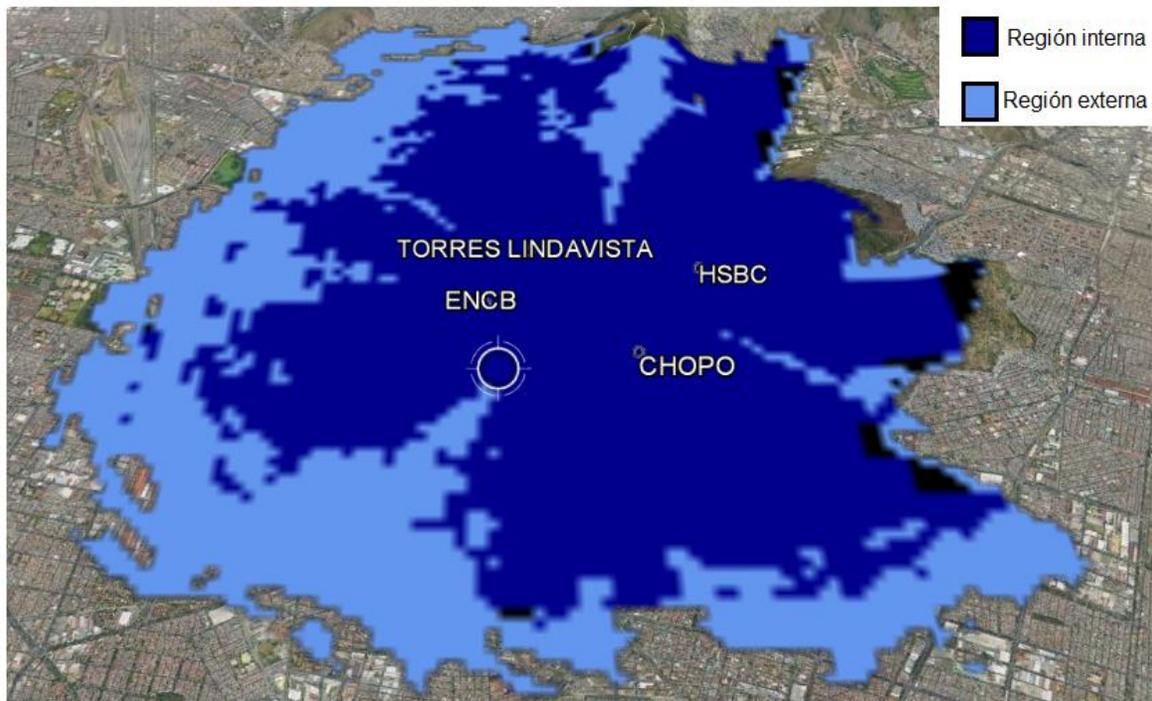


Figura 29.- Región interna y región externa para el esquema de reutilización fraccional

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 29 puede observarse la división del área externa e interna del conjunto de celdas. La región de los sectores del centro no se visualiza debido a que no se encuentran lo suficientemente separados y la potencia de transmisión sobrepasa el área de transmisión del sector que trabaja en la misma banda de frecuencia.

Mediante el control de potencia se pretende hacer que la región interna y la región externa tenga mayor definición, es decir, que sea lo más parecido a dos círculos

De acuerdo al cálculo estadístico del análisis mostrado en la Figura 29 del área total de cobertura la región externa está compuesta por el 38.72 %. Recordando que en el capítulo 1 se mencionó que el porcentaje adecuado después de algunas investigaciones es de 10 a 30 %. Se espera que después de aplicar el control de potencia se logre tener una reducción de este porcentaje en las regiones interna y externa.

4.6 Análisis 3. Control de potencia

4.6.1 Configuración de la red

Para este análisis la configuración de la red modifica los valores de potencia de transmisión de cada sector, estos valores se definen de acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4, obtenidos mediante la elaboración de un programa en MATLAB utilizando la función *fmincon* de la herramienta “optimtool” para funciones no lineales.

Únicamente se modifican los valores de potencia, aplicando un algoritmo de control de potencia al esquema de reutilización de frecuencia maximizando la capacidad de canal y disminuyendo los niveles de interferencia, mejorando la experiencia del usuario y generando mayor ganancia a los proveedores de servicios.

Además de lo anterior, el control de potencia permite disminuir el consumo de energía eléctrica generando un impacto ambiental como ya se ha mencionado.

4.6.2 Análisis de nivel de C/I

En la Figura 30 se muestra el análisis de nivel de C/I aplicando el algoritmo de control de potencia desarrollado en el capítulo 3. Puede observarse de acuerdo al histograma que los valores de C/I están dentro del rango de 15 dB a 30 dB, existiendo insignificantes zonas con valores de 10 dB. Tomando en cuenta que es posible establecer comunicación a partir de los 10 dB, se puede decir que se aprovecha al máximo la capacidad de cada sector al aplicar un método de control de potencia, se redujo de forma considerable el nivel de interferencia lo que permite además transmitir con una modulación mayor y mejor calidad de servicio garantizando el cumplimiento de los requerimientos de una red LTE.

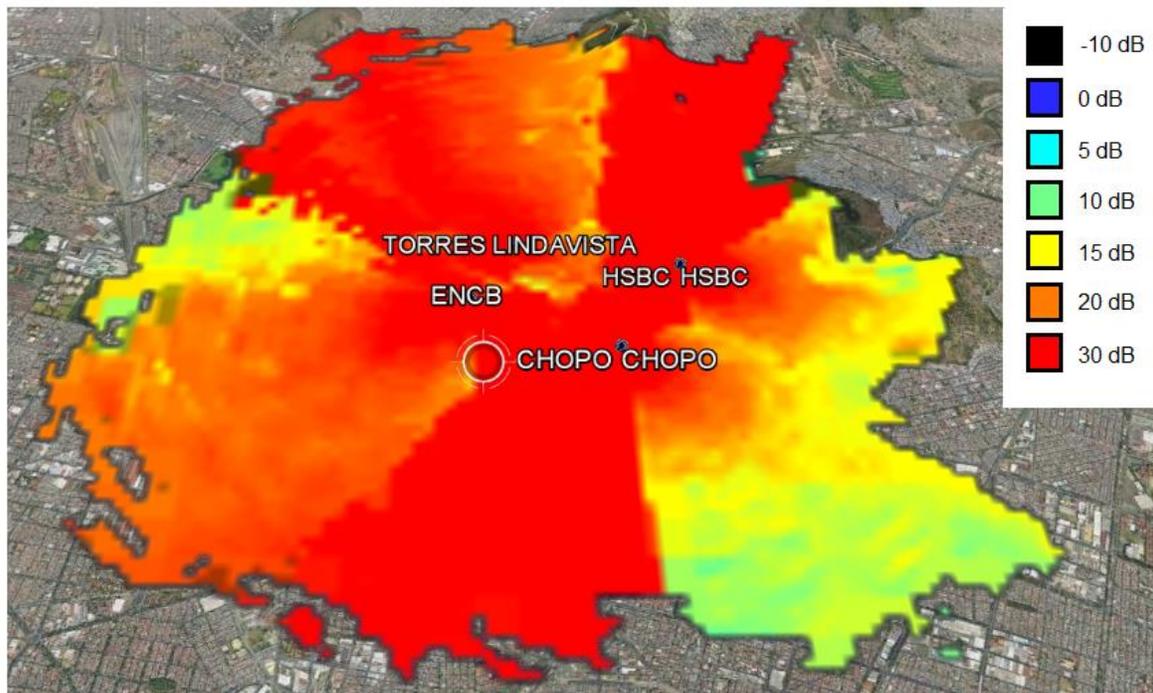


Figura 30.- Análisis de nivel de C/I del sistema aplicando control de potencia al esquema FFR

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que los cortes de color observados en la figura 30 son consecuencia de la división de cada canal asignado a los sectores.

En la figura 31 se muestra una gráfica del porcentaje de área cubierto para cada nivel de C/I, se observa que para niveles de C/I menor a 10 dB el porcentaje es

nulo, demostrando la eficiencia del modelo de optimización que logra disminuir los niveles de interferencia y como consecuencia el aumento de la capacidad de canal del agrupamiento de celdas.

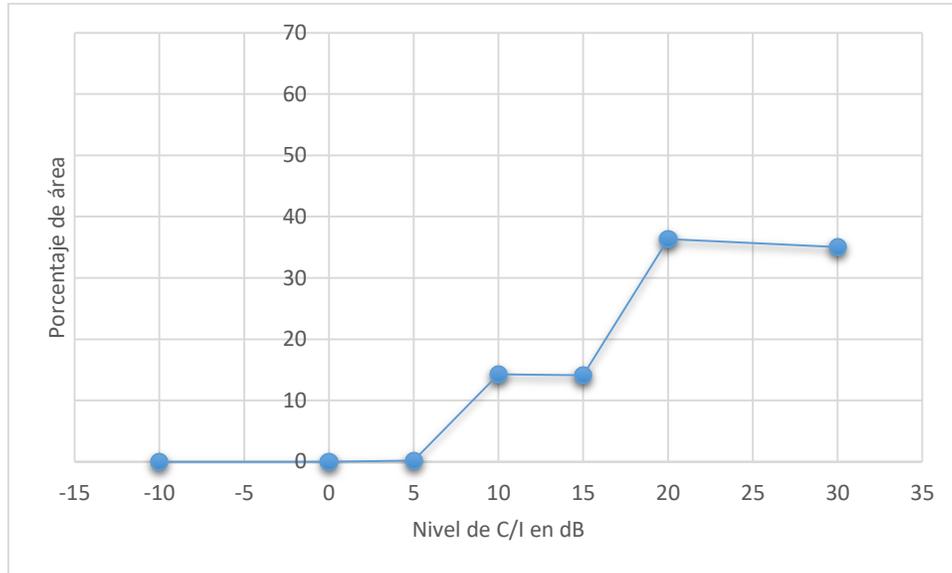


Figura 31.- Grafica del porcentaje de área para cada nivel de interferencia aplicando control de potencia al esquema FFR
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a nivel de C/I el modelo de optimización logra una mejora en la totalidad del área de cobertura de cada sector, por lo que se espera tener un resultado favorable en los siguientes análisis.

4.6.3 Análisis de cobertura de descarga

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de C/I se espera tener un incremento en el área de cobertura de descarga, como se muestra en la Figura 32 existe solo un pequeño porcentaje en los bordes de las celdas, esto se debe a que esa zona está alejada de las antenas y la potencia que es recibida es baja, también podemos observar que en el área central de las celdas se cuenta con cobertura de descarga.

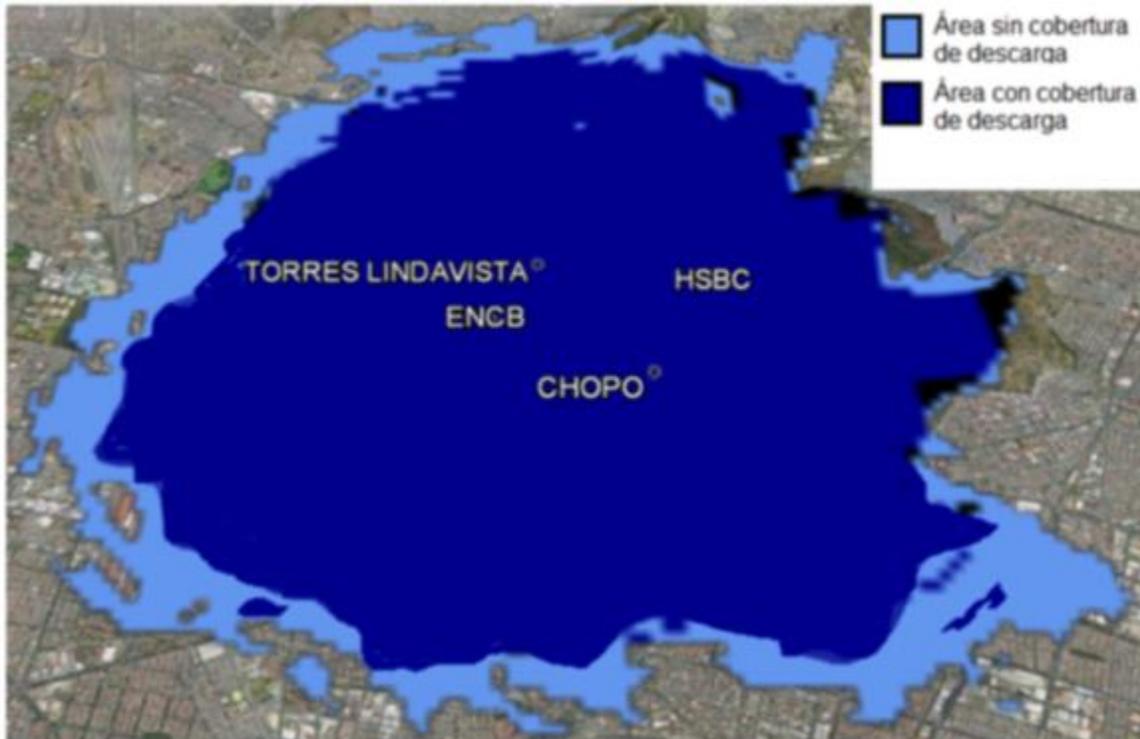


Figura 32.- Análisis de cobertura de descarga aplicando control de potencia al esquema FFR
Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla 11 se cuenta con 81.4% del área total con cobertura de descarga, además de tener un máximo aprovechamiento de la capacidad de canal.

Tabla 11. Porcentaje de área de descarga aplicando control de potencia al esquema de reutilización FFR

Fuente: Elaboración Propia

Parámetro	Porcentaje de área cubierto
Con descarga	81.41 %
Sin descarga	18.58 %

4.6.4 Análisis de Modulaciones

Para el análisis de modulaciones también se tiene una notable mejora, es posible el acceso a modulaciones a partir de 16 QAM en un 80 % del área con cobertura de descarga.

Es muy importante tener modulaciones altas para sea posible alcanzar las velocidades que establece una red LTE. La distribución de cada modulación en el área de cobertura se muestra en la Figura 33. Se puede observar que las modulaciones altas se han extendido alrededor de todos los sectores, es importante aclarar que las modulaciones más bajas abarcan el área en la que ya no se tiene servicio de descarga, por lo que pueden ser descartadas.

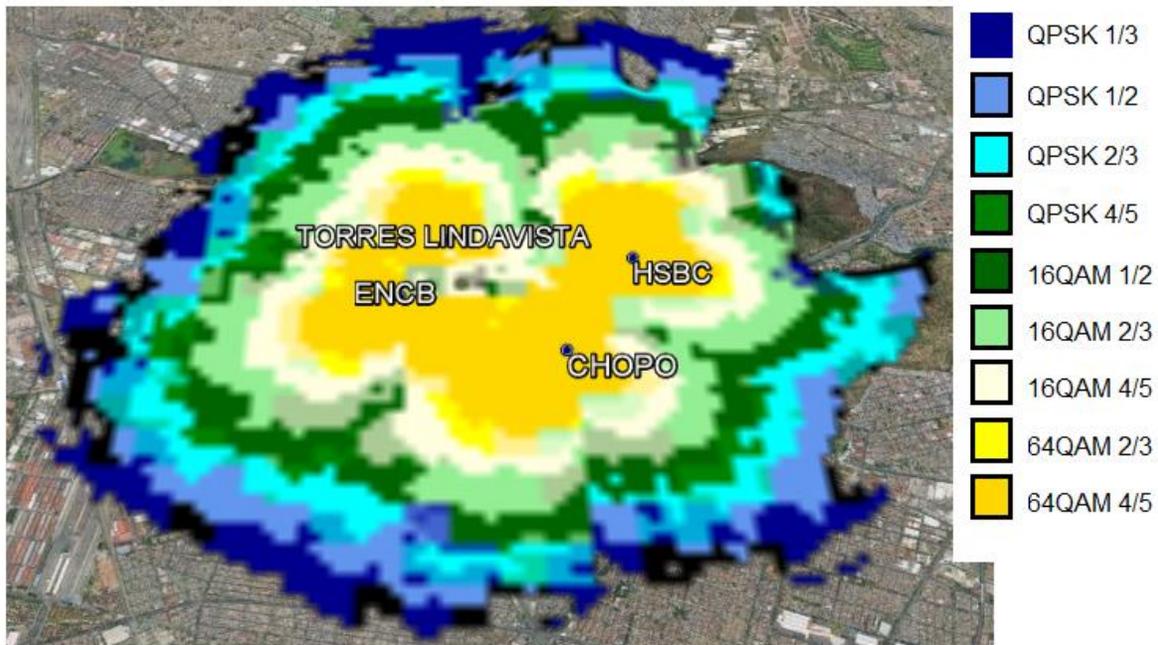


Figura 33.- Análisis de modulaciones aplicando control de potencia al esquema FFR
Fuente: Elaboración propia

De forma más clara, en la Figura 34 se muestra una gráfica del porcentaje que abarca cada modulación en la región de cobertura observándose una mejora significativa al compararse con los análisis anteriores sin control de potencia.

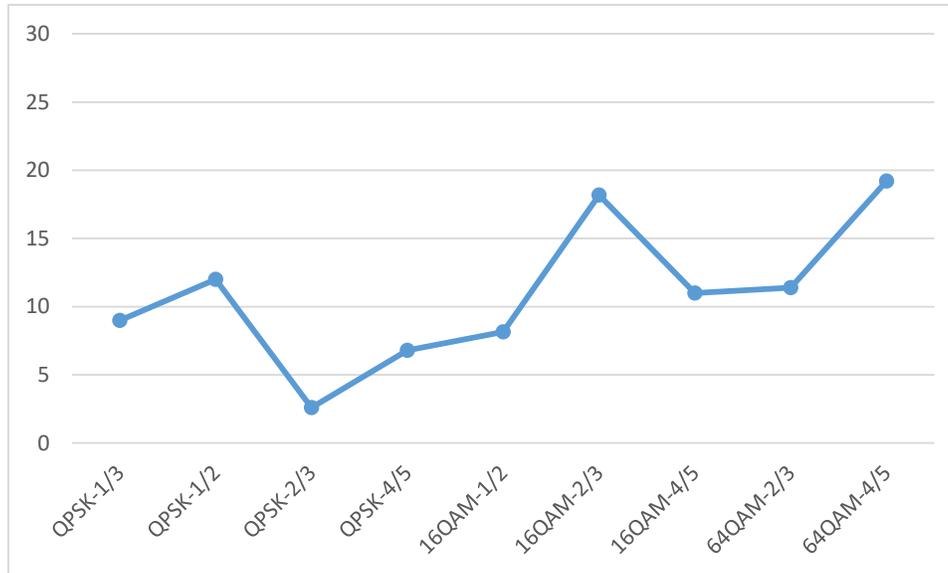


Figura 34.- Grafica del porcentaje de área cubierto para cada tipo de modulación disponible aplicando control de potencia al esquema FFR
Fuente: Elaboración propia

4.7 Graficas comparativas

Esta sección tiene la finalidad de mostrar tres graficas comparativas de los análisis principales, con el fin de observar la mejora que se obtuvo con cada escenario de prueba. Los análisis mostrados son: nivel de C/I, área de cobertura de descarga y modulaciones disponibles.

La Figura 35 muestra las gráficas de los análisis de C/I para los tres casos de estudio (reutilización convencional, FFR fraccional y control de potencia aplicado a FFR).

La grafica en color amarillo nos muestra que es esquema de reutilización convencional tiene un deficiente desempeño al aplicarlo a este escenario en particular, esto surge principalmente por las distancias de separación del radio bases, al tener las estaciones base a distancias cortas la probabilidad de que las frecuencias se traslapen es mayor.

La siguiente grafica en color azul representa la aplicación del esquema FFR sugerido por el 3GPP, de acuerdo al ancho de banda disponible y algunos

estudios se aplica factores de reuso 1 en el centro y 3 en los bordes, se puede observar una disminución de porcentaje para niveles bajos, sin embargo, para los niveles altos se mantiene el mismo porcentaje, nuevamente este problema es consecuencia de las distancias de separación del radio bases y la potencia principalmente.

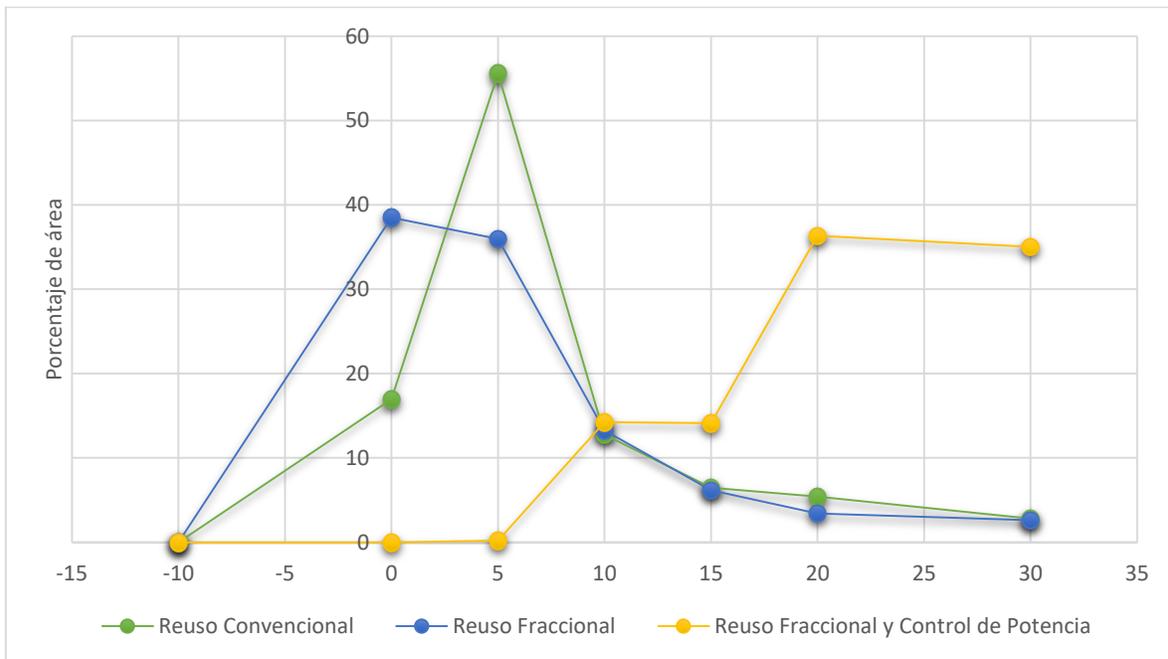


Figura 35.- Grafica comparativa para el análisis de C/I (Reuso convencional fraccional y fraccional con control de potencia)

Fuente: Elaboración propia

Por ultimo podemos observar en la gráfica de color amarillo, análisis en el cual ya se ha aplicado el modelo de optimización basado en control de potencia que los niveles por debajo de los 10 dB son nulos, además de tener un aumento progresivo conforme al nivel de modulación, por lo que el modelo de optimización planteado adapta correctamente los niveles de cada sector de tal forma que reduce la interferencia y maximiza la capacidad de canal.

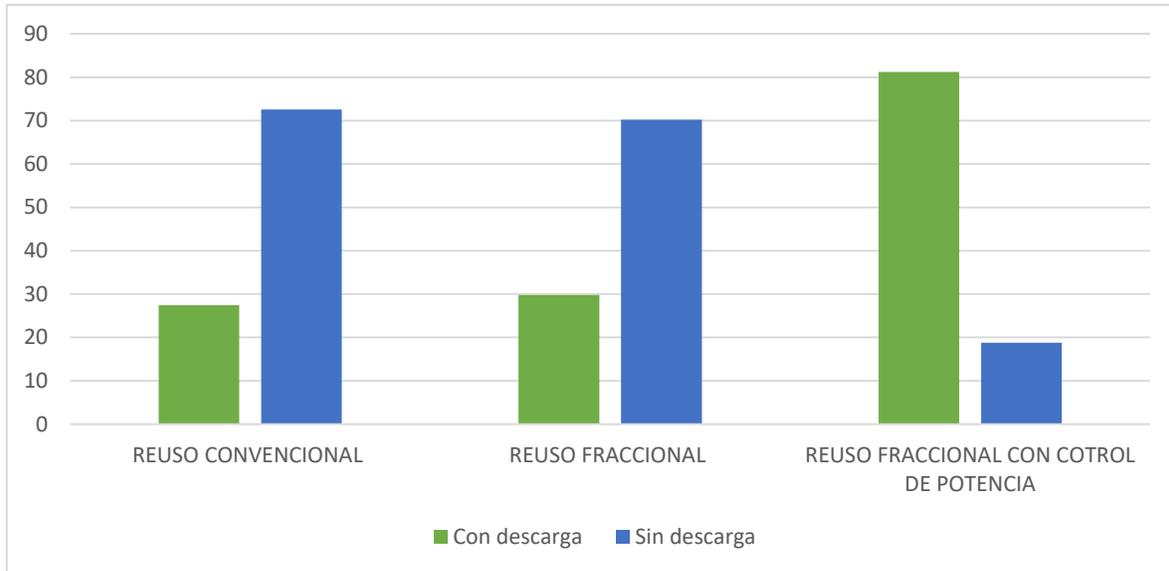


Figura 36.- Grafica comparativa para el análisis de cobertura de descarga (Reuso convencional fraccional y fraccional con control de potencia)
Fuente: Elaboración propia

Por ultimo en la figura 36 se muestra una gráfica comparativa del porcentaje de área que tiene servicio de descarga, se logró duplicar el área con descarga al aplicar el modelo de control de potencia en comparación a los otros dos escenarios. se tiene cobertura en un poco más de 80% del área cubierta por los sectores.

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se propuso un modelo de optimización para incrementar la capacidad de canal de un sistema de celdas LTE para el esquema de Reutilización de Frecuencia Fraccional, este modelo hizo posible hacer un uso eficiente del recurso radioeléctrico ajustándose a las condiciones de la red.

Se logró aumentar el nivel de C/I que a su vez crea la posibilidad de transmitir con modulaciones de nivel superior para alcanzar las velocidades establecidas para LTE.

Se determinó mediante una evaluación que la técnica que da mejor resultado en cuanto al equilibrio entre el nivel de interferencia y la capacidad de canal es la técnica de Reutilización de Frecuencia Fraccional

El modelo de capacidad de canal para una red LTE que se propuso en este trabajo fue alimentado por el parámetro SIR, el cual puede ser determinado con un análisis de interferencia del sistema. Actualmente este análisis es uno de los más básicos incluidos en las plataformas de planeación de redes. Por otro lado, es posible realizar mediciones en puntos clave y alimentar el modelo.

Se maximizó la capacidad de canal para todo el sistema de celdas, logrando la transmisión con altas modulaciones, permitiendo la transferencia de información a altas velocidades.

Se evaluaron tres escenarios diferentes, concluyendo que la asignación de frecuencias convencional y el esquema FFR no son eficientes para un escenario en donde las radio bases se encuentran cerca.

El control de potencia no sólo contribuyó a la disminución del nivel de interferencia, si no también tuvo un impacto positivo al medio ambiente ya que se

logró una transmisión a menor potencia lo cual generó un ahorro de energía eléctrica al proveedor.

El modelo de optimización propuesto está basado en un análisis de interferencias co-canal del sistema, con restricción de nivel de potencia máxima de acuerdo al estándar, sin embargo, es posible agregar condiciones independientes de la función objetivo, por ejemplo: costos o calendarizadores dando paso a la exploración de nuevos modelos de optimización como funciones multi objetivo.

A partir de la versión 10 con la aparición del concepto de redes heterogéneas es posible generar propuestas de mejora y aplicación de los esquemas de reutilización para este tipo de redes.

REFERENCIAS

- [1] González, D., García, L., Ruiz, S., Lemas, M., Dongseop, L. (Nueva York, 2015). Multiobjective optimization of fractional frequency reuse for irregular OFDMA macrocellular deployments. Springer Science+Business Media, pp. 1-5.
- [2] Ghosh G., et al, (Estados Unidos, 2010). Fundamentals of LTE. Ed. Prentice Hall, pp. 152-160
- [3] <http://eleconomista.com.mx/industrias/2015/05/19/att-tardara-18-meses-ofrecer-lte-4g-robusto-mexico>
- [4] Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2015) Modelo y uso de la banda de frecuencias de 700 MHz. pp. 2-8
- [5] Ammer, M. (2012). Optimal Configuration of Fractional Frequency Reuse System for LTE Cellular Networks. Rochester Institute of Technology. Pp. 1.
- [6] Afroz, Farhana, et al. (2015). Interference Management in LTE Downlink Networks. International Journal of Wireless and Mobile Networks. Vol. 7 No. 1. Pp.
- [7] Hindia, M., et al., (Malasia, 2015). Investigation of Frequency Reuse Techniques for LTE Networks. Researchgate. pp. 1-7.
- [8] Hassan, N., (2014). Power Control for Sum Rate Maximization on Interference Channels Under Sum Power Constraint. IEEE. pp. 1-5.
- [9] CNAMA.
- [10] Pañuelas, J. et al. (Barcelona, 2012). 3GPP: Hacia la 4G móvil. Ed. Marcombo. pp. 175-202.
- [11] ETSI. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN). 3GPP TR 25.913 version 7.3.0 Release 7. pp. 8-11.
- [12] ETSI. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 8.3.0 Release 8. Pp 11-15.
- [13] ETSI. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 12.8.0 Release 12). pp 35.

- [14] ETSI. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (3GPP TS 36.133 version 8.3.0 Release 8). pp. 56
- [15] Holma, H., Toskala, A., (Inglaterra, 2009). LTE for UMTS, OFDMA and SC-FDMA based radio access. Ed. Wiley. pp. 283 – 288.
- [16] Agusti, R., et al. (España, 2010). LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Fundación Vodafone España. pp. 21-50
- [17] Abd-Elhamid M. Taha, Najah Abu. LTE, LTE-Advanced and WiMAX: Towards IMT-Advanced Networks
- [18] RELEASE 8, 3GPP.
- [19] Ghaffar, R., Knopp, R. (Francia). Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks. Eurecom. pp. 1-3.
- [20] CNAMA
- [21] Diogenes, M. Generalidades de Redes Celulares. ATEL ASESORES C.A. pp. 1-21.
- [22] TESIS DULCE
- [23] Mogensen, Preben,. *LTE Capacity compared to the Shannon Bound*. Dinamarca, Finlandia. Nokia
- [24] Diogenes, M. Generalidades de Redes Celulares. ATEL ASESORES C.A. pp. 1-21.
- [25] Martínez Ortiz, E. J. Optimización Matemática. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Posgrado en Ingeniería de Sistemas.
- [26] Menthum Planet
- [27] Mahmoud., S., Mostafa, K., Mohamed, S. (Egipto, 2011). Enhanced Frequency Reuse Schemes for Interference Management in LTE Femtocell Networks. IEEE. pp. 1-4
- [28] Abdoulaye, T., et al. (2014). Self-Organizing strategies for enhanced ICIC (eICIC). Orange Labs. Pp. 1-8
- [29] Nokia Networks. LTE networks for public safety services. pp. 5-8

[30] González, D., et al. (2012). Static Inter-Cell Interference Coordination Techniques for LTE Networks: A Fair Performance Assessment. Universidad Politécnica de Catalunya.

[31] <https://www.quora.com/How-do-we-calculate-channel-gain-for-wireless-network-What-is-its-relationship-with-path-loss>

[32] Coupechoux, M., Melif, J. (2013). How to Set the Fractional Power Control Compensation Factor in LTE. Telecom ParisTech. Pp. 1-3.

[33] Ayala, M., Quroz, E. (2012). Análisis de capacidad de servicios multimedia en agrupamientos de celdas LTE. CITEDI-IPN. Congreso Internacional de Computación y Telecomunicaciones. Pp. 1-2.

[34] The Okumura–Hata Model. Mentum Planet

[35] Salo, J., Alam, N. Practical Introduction to LTE Radio Planning.

[36] 3G, HSPA and FDD versus TDD Networking: Smart Antennas and Adaptive Modulation.

[37] Krasniqi, B. "Partial Frequency Reuse for Long Term Evolution". (2011). Universidad Técnica de Viena. Facultad de Ingeniería Eléctrica

[38] Y. Xiang, J. Luo. (2007). "inter cell interference mitigation through flexible resource reuse in OFDM based communication networks", en european wireless 2007, pp1-7

[39] http://www.gi-de.com/es/trends_and_insights/lte_1/a_world_journey/lte-world-journey.jsp

[40] <http://eleconomista.com.mx/tecnociencia/2015/03/06/mexico-despegara-4g-internet-movil-2019>

[41] <http://www.xataka.com.mx/telecomunicaciones/este-es-el-panorama-actual-del-lte-en-mexico-y-el-mundo-segun-opensignal>

[42] <https://www.quora.com/How-do-we-calculate-channel-gain-for-wireless-network-What-is-its-relationship-with-path-loss>

[43] Mentum Planet

[44] Fernandez, Ignacio." Planning and Dimensioning of an LTE Network" (2013). Universidad Politécnica de Catalunya.