

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES



Dimensionamiento LTE en el Escenario de Múltiples Tecnologías de Acceso 3GPP de la Ciudad de Santa Clara

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

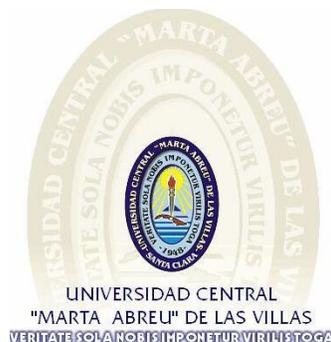
Maestría en Telemática

Sandor Otero Rodríguez

Tutor (es): Dr. C. Héctor Cruz Enríquez

Consultante: M.Sc. Félix Javier Álvarez Herrera
M.Sc. Irina Siles Siles

Santa Clara, Cuba, 2016



Hago constar que la presente Tesis en Opción al Título Académico de Máster en Ciencias Telemáticas fue realizada en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de Maestría en Telemática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicado sin autorización de la Institución.

Ing. Sandor Otero Rodríguez

Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección del centro de altos estudios y cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Ing. Sandor Otero Rodríguez

Autor

Fecha

Dr. C. Vitalio Alfonso Reguera

Jefe del Departamento

Fecha

Dr. C. Félix F. Álvarez Paliza

Coordinador de la Maestría en Telemática

Fecha

RESUMEN

El desarrollo de las comunicaciones móviles y la sociedad han estado estrechamente relacionados, por una parte, la tecnología incrementa y facilita las oportunidades de los usuarios y de otra manera da lugar a ciertos tipos de comportamientos sociales. La penetración es tal que las suscripciones superan la población mundial. LTE como exponente instituido de la cuarta generación constituye la tecnología estable de mayores prestaciones cuyos aspectos más significativos consisten en el soporte de todos los servicios sobre IP y el alcance de velocidades del rango de 100 Mbps y 1Gbps. La evolución de las redes móviles implica en gran medida la convivencia de redes de acceso de diferentes tecnologías, y el grupo 3GPP; proyecto encargado del desarrollo de reportes y especificaciones de tecnologías móviles, garantiza la coexistencia de redes de acceso de múltiples tecnologías. El dimensionamiento de este tipo de redes es un proceso complejo y las herramientas de software contribuyen a la obtención de resultados satisfactorios en este proceso. El Atoll es la herramienta seleccionada para el dimensionamiento de este proyecto y el escenario objeto de estudio es la ciudad de Santa Clara cuya red actual es GSM/UMTS. La propuesta garantiza una red que satisface los requerimientos actuales de los usuarios que cada vez son más exigentes manejando contenidos fundamentalmente de video y en donde son mayores los elementos interconectados intercambiando información, considerando la red de acceso como un punto importante en la determinación de la capacidad que se experimenta en una red móvil.

Palabras Clave: comunicaciones móviles, evoluciones, LTE, 3GPP, dimensionamiento, Atoll.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1. REDES MÓVILES CELULARES. EVOLUCION 5

 1.1 Evolución Generacional de las Comunicaciones Móviles. 5

 1.2 Actualidad, Tendencias y Pronósticos. 6

 1.3 Principios de Evolución y Expansión. 9

 1.3.1 Cobertura y Velocidad de Trasmisión..... 10

 1.3.2 Redes de Múltiples Tecnologías de Acceso. 11

 1.4 Sistema LTE..... 13

 1.4.1 Arquitectura para la Conexión de E-UTRAN con una Red de Acceso 3GPP..... 14

 1.4.2 Tecnologías a Nivel Físico. 15

 1.4.3 Capa Física. 16

 1.4.4 Reutilización de Frecuencias. 17

 1.5 Propuestas de Procedimientos para el Dimensionamiento LTE..... 17

 1.5.1 Criterios Generales de Dimensionamiento. 23

 1.6 Conclusiones Parciales. 24

CAPITULO 2. DESPLIEGUE DE LA RED DE ACCESO LTE 25

 2.1 Herramientas de Simulación de Redes de Acceso Móviles. Atoll. 25

 2.2 Atoll para el Dimensionamiento..... 26

 2.3 Simulaciones de Monte Carlo. 28

 2.4 Análisis estadístico. 29

 2.5 Planificación de la Red de Acceso LTE. 30

 2.5.1 Descripción del Escenario. 31

 2.5.2 Modelo de Propagación..... 32

 2.5.3 Banda de Frecuencia. 38

 2.5.4 Balance del Enlace..... 39

 2.5.5 Ancho de Banda..... 40

 2.5.6 Área de Cobertura..... 40

 2.5.7 Radio de la Celda..... 42

 2.5.8 Capacidad de la Celda..... 44

 2.5.9 Cantidad de Usuarios 44

 2.6 Conclusiones Parciales. 45

CAPITULO 3. ANALISIS Y EVALUACION DE LOS RESULTADOS	46
3.1 Predicciones de Cobertura.	47
3.1.1 Análisis del Nivel de Señal.....	47
3.1.2 Análisis de Señal Efectiva.	48
3.1.3 Análisis del Área de Servicio.	48
3.1.4 Análisis de la Relación Señal Interferencia más Ruido.	49
3.1.5 Análisis de Cobertura por Throughput.....	50
3.1.6 Análisis de Cobertura por Indicador de Calidad.....	51
3.2 Simulaciones de Tráfico.	52
3.2.1 Parámetros de Tráfico.	52
3.2.2 Throughput por Radiobase.	53
3.3 Conclusiones Parciales.	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Suscriptores de telefonía móvil en el mundo. Elaboración propia.	5
Figura 1.2 Usuarios móviles en Cuba hasta marzo 2016. Elaboración propia.	8
Figura 1.3 Penetración de usuarios móviles hasta marzo 2016. Elaboración propia.	9
Figura 1.4. Ganancia de capacidad conjunta respecto a gestión independiente. Elaboración propia	12
Figura 1.5. Arquitectura del sistema LTE. Tomado de [2].....	13
Figura 1.6 Componentes asociados al despliegue LTE. Elaboración propia.....	23
Figura 2.1. Flujo de trabajo. Elaboración propia	28
Figura 2.2. Comparación de las pérdidas de los modelos de propagación. Elaboración propia.	38
Figura 2.3. Área de cobertura y tipo de modulación. Elaboración propia.....	43
Figura 3.1. Escenario de trabajo. Ciudad de Santa Clara. Elaboración propia.	46
Figura 3.2. Nivel de señal LTE recibida en el enlace descendente. Elaboración propia.....	47
Figura 3.3. Nivel de señal recibida en valores de potencia de señal piloto. Elaboración propia.	48
Figura 3.4. Portadores asignados en el área de cobertura. Elaboración propia.	49
Figura 3.5. SINR en el enlace descendente. Elaboración propia.	50
Figura 3.6. Cobertura por throughput en el enlace descendente. Elaboración propia.....	50
Figura 3.7. Cobertura por indicador de calidad del canal. Elaboración propia.	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Evolución de las comunicaciones móviles. Elaboración propia.....	6
Tabla 1.2. Entidades de red e interfaces de E-UTRAN. Elaboración propia.	14
Tabla 1.3. Velocidades máximas en función de la canalización. Elaboración propia.	17
Tabla 2.1. Predicciones de cobertura disponibles en Atoll. Elaboración Propia.	26
Tabla 2.2. Tráfico GSM del escenario de trabajo en la hora cargada. Elaboración propia.	31
Tabla 2.3. Características del escenario de estudio para LTE. Elaboración propia.	32
Tabla 2.4. Pérdidas en el espacio libre. Elaboración propia.	33
Tabla 2.5. Resultados del modelo Hata-Cost 231. Elaboración propia.....	35
Tabla 2.6. Parámetros aplicados en el modelo Cost 231. Elaboración propia.....	36
Tabla 2.7. Pérdidas modelo COST-231.	37
Tabla 2.8. Banda 3 LTE y ancho de banda. Elaboración propia.	38
Tabla 2.9. Número de canales E-UTRA. Tomado de [47].	39
Tabla 2.10 Sensibilidad de referencia para QPSK. Tomado de [48].	40
Tabla 2.11. Configuración de transmisión. Elaboración propia.	40
Tabla 2.12. Tipos de modulación en LTE. Elaboración propia.	41
Tabla 2.13. Radio de la celda de acuerdo al tipo de modulación. Elaboración propia.....	42
Tabla 2.14. Área de cobertura por tipo de modulación empleado.	43
Tabla 2.15. Cantidad de RB por tipo de modulación. Elaboración propia.	43
Tabla 2.16. Cálculo de usuarios por sitio. Elaboración propia.	44
Tabla 3.1. Análisis comparativo de cobertura por tipo de modulación. Elaboración propia.....	49
Tabla 3.2. Comparación área cubierta por throughput. Elaboración propia.....	51
Tabla 3.3. Demanda máxima de throughput por tipos de servicios. Elaboración propia.	52
Tabla 3.4. Tipos de movilidad. Elaboración propia.	52
Tabla 3.5. Tipo de Terminal LTE. Elaboración propia.	52
Tabla 3.6. Perfiles de usuarios LTE. Elaboración propia.	52
Tabla 3.7 Entornos utilizados. Elaboración propia.	53
Tabla 3.8. Throughput por servicio en el enlace descendente. Elaboración propia.	53

INTRODUCCIÓN

El crecimiento en las comunicaciones móviles ha constituido un proceso ininterrumpido, de la mano fundamentalmente de GSM, UMTS y LTE, marcando una evolución por décadas desde los años 80 del siglo pasado, siendo la cuarta generación el eslabón estable de mayores prestaciones en la que el sistema LTE es su máximo exponente y cuya primera especificación fue concluida por el grupo 3GPP a finales de 2008. Son muchas las variantes que LTE introduce en relación a los sistemas de comunicaciones móviles previos, sin embargo, dos aspectos relevantes cabrían destacar, por primera vez todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo IP y las velocidades máximas en la interfaz de radio se sitúan dentro del rango de 100 Mbps y 1Gbps [1].

La convivencia de redes de acceso radio de diferentes tecnologías constituye una característica inherente a la propia evolución de los sistemas de comunicaciones móviles. La adopción de una nueva tecnología de radio pocas veces representa un proceso disruptivo, sino que resulta habitual que diferentes soluciones formen parte de una misma infraestructura de red. La coexistencia de múltiples y diversas tecnologías también viene propiciada por su adecuación a diferentes aplicaciones y escenarios de operación. A modo de ejemplo las soluciones WiFi utilizadas para proporcionar acceso radio a redes fijas de comunicaciones de banda ancha, representan una alternativa interesante para la provisión de los servicios propios de las redes móviles en entornos domésticos, oficinas, hoteles, aeropuertos, entre otros. Por tanto, la propia evolución y mejora de los sistemas de comunicaciones, unido a la utilización de las tecnologías adecuadas en cada entorno de operación, conduce a la coexistencia de diferentes tecnologías de radio en los sistemas de comunicaciones móviles. Las redes de comunicaciones resultantes de la utilización de múltiples tecnologías de acceso radio se conocen como redes heterogéneas [2].

El sistema LTE ha sido diseñado para soportar despliegues de su red de acceso que coexista con otras redes de acceso radio. Particularmente el servicio de conectividad IP de la red troncal de LTE (EPC, *Evolved Packet Core*), puede ofrecerse también a través de las redes de acceso 3GPP anteriores, es decir, UTRAN y GERAN. La interconexión de estas redes se realiza mediante interfaces específicas con la red troncal de manera que se garantiza la continuidad de los servicios cuando los terminales cambian de red de acceso, por ejemplo, el soporte de mecanismos de *handover* entre tecnologías 3GPP.

Las redes móviles existentes no son desaprovechadas cuando se ven involucradas en procesos evolutivos. Los operadores plantean e implementan sus evoluciones tecnológicas apoyándose en las redes existentes; estudios revelan y demuestran la eficiencia de la explotación de las redes de manera conjunta. Esto hace que la evolución constituya un proceso no violento en el cual el usuario no percibe más que la posibilidad del disfrute de un nuevo servicio, una nueva facilidad, el acceso a un nuevo contenido o de manera general el aumento de la calidad de su experiencia como usuario móvil.

Las redes LTE constituyen la propuesta de evolución ya establecida de mayores prestaciones en el mundo móvil; el 40% de los usuarios móviles hace uso de la tecnología LTE y se estima para el 2021 un 75%. Debido a que el consumo de LTE está justificado por la mejora en la experiencia del usuario y la velocidad desplegada en la red [3]. Los recursos ofrecidos tras el dimensionamiento LTE permiten satisfacer las demandas impuestas actualmente por los usuarios, cuyas suscripciones móviles superan al número de personas que habitan este planeta.

Debido a que las redes móviles actuales GSM/UMTS, como es el caso de la ciudad de Santa Clara, no garantizan las crecientes demandas de tráfico de usuarios que cada vez manejan más contenidos y aplicaciones, fundamentalmente de video y que en cada momento son mayores los elementos interconectados de manera inalámbrica intercambiando información, considerando la red de acceso de las redes móviles como un punto importante en la determinación de la capacidad que se experimenta en una red móvil, se formula el siguiente **problema científico**:

¿Cómo satisfacer la creciente demanda de contenidos, servicios, y aplicaciones de usuarios en una red móvil GSM/UMTS?

La investigación tiene como **objeto de estudio** las redes de cuarta generación y el **campo de acción** estará enfocado en el dimensionamiento de la red de acceso LTE en el escenario GSM/UMTS de la ciudad de Santa Clara.

En correspondencia con el problema científico el **objetivo general** de esta investigación consiste en proponer un dimensionamiento de la red de acceso LTE en el escenario de múltiples tecnologías de acceso 3GPP de la ciudad de Santa Clara para satisfacer los requerimientos actuales de los usuarios.

Para alcanzar el objetivo general han sido planteado los siguientes **objetivos específicos**:

1. Describir la evolución de las redes móviles así como analizar el contexto actual y tendencias de las mismas.
2. Caracterizar la tecnología de cuarta generación LTE.
3. Valorar la herramienta de simulación Atoll.
4. Describir el escenario objeto de estudio GSM/UMTS.
5. Modificar el escenario existente con el dimensionamiento de la red de acceso LTE y evaluar el resultado haciendo uso de la herramienta de simulación Atoll.

Para el desarrollo de la investigación se llevan a cabo las siguientes **tareas científicas**:

1. La descripción de las redes móviles con sus etapas evolutivas y el análisis de su estado actual y futuro.
2. La caracterización de los sistemas de cuarta generación 4G o LTE.
3. El análisis de la herramienta de simulación Atoll.
4. La modificación de un escenario dado, tras el dimensionamiento de red LTE y la evaluación de los resultados.

Con el objetivo de garantizar los actuales requerimientos de los usuarios y tomando en cuenta las tendencias de las redes móviles, como **novedad científica** se pretende aprovisionar la herramienta de simulación Atoll para el dimensionamiento de la red de acceso LTE con los parámetros de entrada adecuados asociados con el escenario GSM/UMTS de la ciudad de Santa Clara ofreciendo así un acceso múltiple de tecnologías 3GPP.

Como **aportes de la investigación** se conocerá el estado actual de las redes móviles en el contexto universal, así como las tendencias y desarrollos de las mismas, cada vez más influenciadas por los

exigentes requerimientos de los usuarios. De manera práctica el desarrollo de este proyecto permite transformar un escenario real contribuyendo al mejoramiento de la calidad de la experiencia de los usuarios móviles, el incremento de sus expectativas de calidad de servicio, así como la oportunidad de acceder a nuevos contenidos y aplicaciones disponibles en la actualidad. La propuesta de dimensionamiento ofrece una solución tecnológica, viable y capaz de satisfacer los requerimientos actuales de los usuarios y sus tendencias, en un escenario de acceso múltiple de tecnologías 3GPP. Con la configuración adecuada de la herramienta de simulación Atoll será posible la planificación de redes avanzadas de múltiples tecnologías de acceso permitiendo la implementación detallada y precisa de una red E-UTRAN, así como la reducción del tiempo durante el dimensionamiento de dicha red, posibilitando el estudio y la optimización de su comportamiento. La inclusión de LTE permite hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, lo que puede contribuir a la reducción de los costos del operador, y, por tanto, el aumento de la posibilidad del usuario de acceder a los servicios de una manera más económica satisfaciendo sus demandas de conectividad.

Los **criterios de selección de la tecnología** han sido conducidos fundamentalmente por la periodicidad con la que han evolucionado las redes móviles, demostrada desde sus primeras generaciones hasta la fecha. Esto permite afirmar que las redes LTE constituyen la tendencia de los operadores móviles en la actualidad, que apuestan por soluciones tecnológicas escalables, estables y sólidas en sus implementaciones. La aplicación de la herramienta de simulación Atoll está fundamentada por la existencia de un módulo LTE que permite implementar las características de una red E-UTRAN. Además, ofrece la posibilidad de crear redes avanzadas de múltiples tecnologías, como por ejemplo GSM/UMTS/LTE haciéndola un software ideal para operadores que necesitan evolucionar sus redes. Una vez hallado que Atoll satisface las necesidades requeridas, es válido destacar que este software es usado por el Departamento de Servicios Móviles de Etecsa para el planeamiento y la optimización de sus redes de acceso disponiendo de licencias para la realización de proyectos.

La investigación se desarrolló utilizando los siguientes **métodos y técnicas**:

- Método histórico-lógico el cual permite visualizar la evolución de las generaciones móviles, sus principios y desarrollos.
- Método analítico-sintético debido a la necesidad de trabajar sobre los componentes de la red de acceso de las tecnologías 3GPP.
- Método deductivo dado que se admiten los requerimientos y exigencias de usuarios a nivel global y se aplican en un escenario local.
- Método predictivo dada la posibilidad de prever eventos en la red de acceso.
- La observación mediante la cual se contextualiza la red LTE dentro de la evolución de las redes móviles.
- Método estadístico-matemático debido a la organización de datos necesarios en las predicciones y simulaciones para la evaluación de los escenarios analizados.

Para satisfacer los objetivos planteados se **estructura** el trabajo en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos. En la introducción se define la necesidad, actualidad e importancia del tema que se aborda. En el capítulo primero se realiza una descripción de la evolución

de las redes móviles, se analiza el contexto actual, tendencias y principios, se caracteriza el sistema LTE y se revisan las propuestas de procedimientos para su dimensionamiento. En el segundo capítulo se define la herramienta de simulación a emplear en el dimensionamiento, además de la planificación de la red de acceso. El tercer y último capítulo muestra los resultados del dimensionamiento obtenidos sobre el escenario de trabajo.

Como resultado se espera garantizar los actuales requerimientos de usuarios luego de la obtención de una red móvil de múltiples tecnologías de acceso 3GPP. De esta misma forma tras el dimensionamiento de la red haciendo uso de la herramienta de simulación Atoll es posible realizar ajustes que tributan al mejoramiento del desempeño de la red y por tanto mejoras en la calidad de servicio y calidad de la experiencia del usuario. Estos ajustes constituyen un proceso sistemático dado por la naturaleza extremadamente dinámica de las redes móviles, lo que comúnmente se llama proceso de optimización. Se espera además contextualizar a los interesados en este trabajo en los antecedentes, actualidad y tendencias de las redes móviles y será posible realizar un dimensionamiento eficiente de la red para una demanda futura estimada.

CAPITULO 1. REDES MÓVILES CELULARES. EVOLUCION

1.1 Evolución Generacional de las Comunicaciones Móviles.

Las tecnologías y la sociedad están en un continuo proceso de influencia mutua. Este es el caso específico de las comunicaciones móviles. Por un lado, las comunicaciones móviles tienen la capacidad de aumentar y facilitar las elecciones de los usuarios. Por otro lado, las características propias de las comunicaciones móviles propician en mayor grado cierto tipo de comportamientos sociales [4].

Esta estrecha relación entre tecnología y sociedad es la que permite que en la actualidad las comunicaciones móviles sean las tecnologías que sufren una mayor demanda y a las que se les están dedicando más recursos para desarrollarlas al máximo. Es esta capacidad que tiene la tecnología móvil de llegar a tantas personas lo que ha hecho que su avance tecnológico en el tiempo sea tan rápido. Prueba de ello se observa en la Figura 1.1, cuyos datos se extraen de [5] donde se analiza la evolución de las suscripciones móviles a lo largo de los últimos años superando el valor de la población mundial.

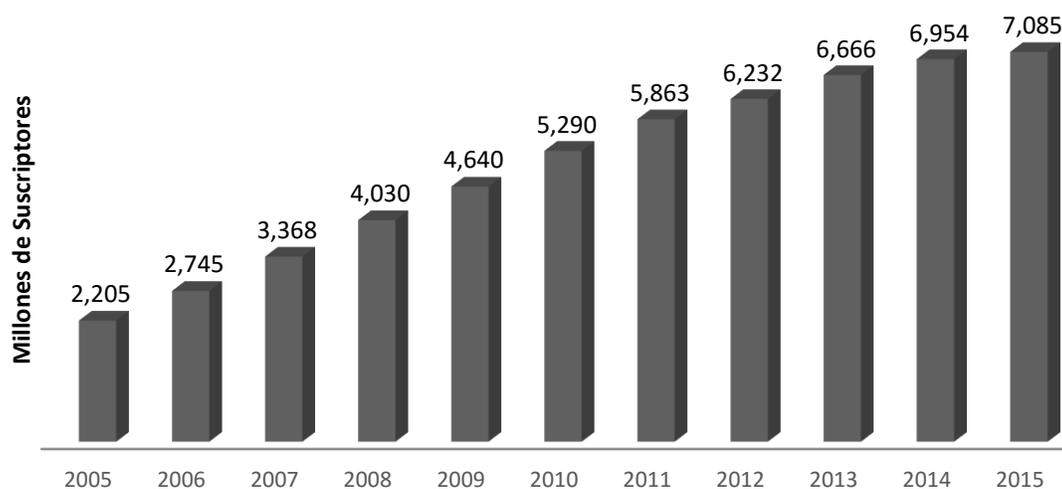


Figura 1.1. Suscriptores de telefonía móvil en el mundo. Elaboración propia.

Las transformaciones a las que las comunicaciones móviles han dado lugar deben entenderse como nuevas formas de conseguir sus objetivos para los individuos, las empresas y las administraciones. Incluso, en muchos casos se trata de actividades que no habrían sido posibles sin la existencia de las comunicaciones móviles [4]. Este avance en las comunicaciones móviles ha permitido el desarrollo de dispositivos móviles cada vez más sofisticados, ágiles e intuitivos para los usuarios, siendo capaces de ofrecer una amplia gama de aplicaciones y haciendo del teléfono móvil una herramienta indispensable en el uso cotidiano de la sociedad actual. Un hecho evidente y que ha sido una constante a lo largo de la historia es que el desarrollo tecnológico siempre ha venido ligado al transcurso de alguna crisis. En este caso, el desarrollo de la tecnología móvil nació en 1940, después de la Segunda Guerra Mundial. Concretamente, fue una vez finalizada la guerra cuando se aprovecharon todos los dispositivos útiles

para fines comerciales. Dispositivos tales como la radio, el radar, el *walkie talkie* entre otras tecnologías inalámbricas constituyeron todo un éxito.

En diciembre de 1947, surgen los sistemas móviles celulares de la mano del equipo formado por W.R. Young y D.H. Ring. El trabajo realizado por ambos en los laboratorios Bell fue el detonante de la creación de las bases de lo que hoy conocemos como comunicaciones móviles celulares. Young y Ring fueron los que diseñaron la división de un territorio extenso en pequeñas áreas de geometría hexagonal, a las que le pusieron el nombre de celdas y como eran áreas de terreno poco extensas donde no se necesitaba una elevada potencia en el equipo transmisor para cubrirlas. También introdujeron el concepto de reuso frecuencial entre distintas celdas, alejadas lo suficiente entre sí para no producirse interferencia, y el concepto de *handover*, que permitiría la continuidad de las comunicaciones entre los usuarios que viajaban entre celdas vecinas. Fue tal la novedad que suponía la implantación de este sistema pero la limitante en el número de teléfonos móviles disponibles, así como el espectro disponible o el número de canales accesibles que hicieron falta decenas de años, en concreto 40 años, para implementar este servicio de telefonía móvil y que ofreciera una alta capacidad [6].

Desde su implantación, los sistemas móviles celulares han ido evolucionando a partir de las necesidades que se han ido experimentando y de los recursos que permanecían accesibles en cada época. Fruto de ello, esta tecnología ha ido evolucionando por generaciones, como se muestra en la Tabla 1.1, siempre intentando sacar provecho de la generación anterior, mejorando sus limitaciones y aprovechando sus capacidades.

Tabla 1.1. Evolución de las comunicaciones móviles. Elaboración propia.

Generación	Alcances
1G	Tecnología analógica. De 1980 en adelante. Varias tecnologías fueron desarrolladas, nacional o regionalmente incluyendo NMT (<i>Nordic Mobile Telephone</i>), AMPS (<i>Advanced Mobile Phone System</i>), TACS (<i>Total Access Communications System</i>), RTMI (<i>Radio Telefono Mobile Integrato</i>), JTACS (<i>Japan Total Access Communications System</i>).
2G	Primeros sistemas digitales. Desarrollados en los 90, introducen la voz, SMS y servicios de datos. Las tecnologías primarias son: GSM/GPRS, CDMAOne, PDC, iDEN, IS-136 o D-AMPS.
3G	Permitió una visión global para la evolución de las redes 2G, con tecnologías que han sido promovidas por la familia de sistemas IMT-2000. Tecnologías como EDGE (<i>Enhanced Data for GSM</i>), CDMA2000 1X/EVDO, UMTS-HSPA+.
+ 3G	LTE y LTE-Advanced han tocado el límite generacional ofreciendo las capacidades de las próximas generaciones. Con capacidades de datos de alta velocidad, alta eficiencia espectral y adopción de tecnologías avanzadas de radio emergen como la base para los sistemas móviles del futuro. Es notable que LTE-Advanced clasifica como una interfaz de radio ITU-R IMT-Advanced.

1.2 Actualidad, Tendencias y Pronósticos.

Actualmente existen suscriptores móviles en el mundo tanto como personas habitan este planeta, y en cada segundo se activan 20 nuevas suscripciones de banda ancha [7]. Consecuentemente el tráfico de datos móviles en el último cuarto de 2015 fue un 65% superior con respecto al último cuarto de 2014,

mayormente conducido por un incremento en el consumo de video y se estima un crecimiento anual de un 45 % hacia el 2021. Casi el 70% del tráfico de datos móviles será de video para el 2021, o sea el video *streaming* permanece como el mayor generador de tráfico datos móviles. El crecimiento de tráfico de video está sustentado fundamentalmente por el incremento de la disponibilidad y popularidad de servicios de contenidos de video, dispositivos con altas resoluciones de pantalla y altos desempeños de las redes que permiten una mejor calidad en la experiencia de los usuarios. Las redes sociales le siguen al video en tráfico. Además de los teléfonos móviles se estima que existirán una multitud de dispositivos conectados comunicándose. El número total de suscriptores está creciendo alrededor del 3 % año tras año. La India fue quien más creció en términos de adición de red, más de 21 millones, seguido de China con más de 6 millones, Estados Unidos con más de 5 millones, Myanmar más de 5 millones y Nigeria más de 3 millones de suscripciones [8].

Los *smartphones* representaron el 75 % de todos los móviles vendidos en el último cuarto de 2015, comparado con el 70% durante el último cuarto de 2014. Por otra parte, el número de suscripciones móviles de banda ancha está creciendo globalmente un 25 % año tras año incrementándose en 200 millones en el último cuatrimestre de 2015. Las suscripciones LTE continúan en ascenso y han alcanzado un total de 1 billón de suscripciones con aproximadamente 160 millones adicionales en el último periodo de 2015. Las suscripciones 3G se incrementaron en 30 millones durante el último cuatrimestre de 2015. La mayoría de las suscripciones 3G/4G tienen acceso 2G como fondo y las suscripciones 2G puras han decrecido en 90 millones [8].

El tráfico de datos móviles se espera que crezca a una razón de crecimiento anual compuesta (*CAGR*, *Compound Annual Growth Rate*) de un 45 % hacia el 2021, 10 veces en los próximos 6 años. El tráfico de datos móviles agregado a la red en el 2015 fue de 20 EB, la mitad de los cuales consistió en tráfico de video. El tráfico de video adicional es comparable con el tamaño de tres filmes por suscriptor. Los cálculos tienen como base los siguientes parámetros: video con calidad DVD-resolución 480p, códec H-264, razón media de 1.2Mbps y el tamaño de un filme es de 90 minutos. El video representó el 50 % del tráfico de datos móviles en el 2015. Hoy en día más personas se comunican usando texto que llamadas de voz, compartiendo fotos y videos a través de las redes sociales. El tráfico acumulado de las redes sociales se pronostica que sea de 180 EB para los próximos 6 años, lo cual es comparable con que cada persona en la tierra use 35 minutos las redes sociales cada día o un total de más de 200 billones de fotos vistas cada día. Se asume que en una hora de uso de redes sociales se consumen 20 MB como promedio sin incluir streaming de video y que el tamaño de una foto promedio es de 400 KB [9].

Se percibe un fuerte incremento del tráfico de datos móviles mientras el tráfico de voz lo hace discretamente. Este tráfico de datos está dado por el incremento en las suscripciones de *smartphones* y el continuo crecimiento del consumo promedio de datos por suscriptor justificado fundamentalmente por el acceso a los contenidos de video. El tráfico de datos creció un 12 % de cuarto a cuarto y un 65 % de un año a otro. En recientes mediciones de red se observa un crecimiento superior al anticipado en el tráfico de datos promedio consumido por usuario, esto debido al incremento de las suscripciones *smartphones* esencialmente LTE, y el pronóstico para el 2021 es un incremento de 10 veces el tráfico total para todos los dispositivos [10].

Hoy las expectativas de los usuarios son: alta calidad de experiencia y continua mejora de los servicios. La evolución de las capacidades de las redes es la clave para asegurar tales expectativas. Nuevas funcionalidades en la red móvil y capacidades de servicios están siendo implementadas para voz y

datos. Esto incluye mejoras en las velocidades de bajada y subida en 3G y 4G. Mejoras en la calidad de voz, servicios de comunicaciones enriquecidos como voz HD móvil, VoLTE, comunicación de video y mensajes enriquecidos se ofrecen en las redes basadas en IP. Para asegurar un buen desempeño en las redes móviles las tecnologías de *backhaul* juegan un papel importante por lo que su evolución constituye una necesidad. En el Anexo X se muestra la población cubierta por cada tecnología. La capacidad para utilizar la tecnología está sujeta a factores tales como el acceso a los dispositivos y las suscripciones. Como resultado de análisis y estudios del comportamiento de las redes móviles en general, son obtenidos elementos que permiten orientar los esfuerzos en función de satisfacer y garantizar los requerimientos de los usuarios móviles. Con ello es posible además realizar predicciones y pronósticos útiles en el planeamiento de evoluciones de redes móviles [7].

En el contexto nacional existen actualmente casi 3.6 millones de usuarios, cifra que ha ido incrementándose desde el año 2000 como se muestra en la Figura 1.2 y Figura 1.3, con una razón de crecimiento anual compuesta de 47.97% en los últimos 16 años. La tasa de crecimiento anual compuesto es un cálculo que produce un resultado sobre una base anual compuesta. El valor inicial, el valor final y el número de años son los componentes claves para averiguar el CAGR en porcentaje. La tasa de crecimiento anual compuesta, es un método de estimación del promedio de crecimiento anual de una inversión o alguna parte, dígame usuarios, durante un período de tiempo especificado.

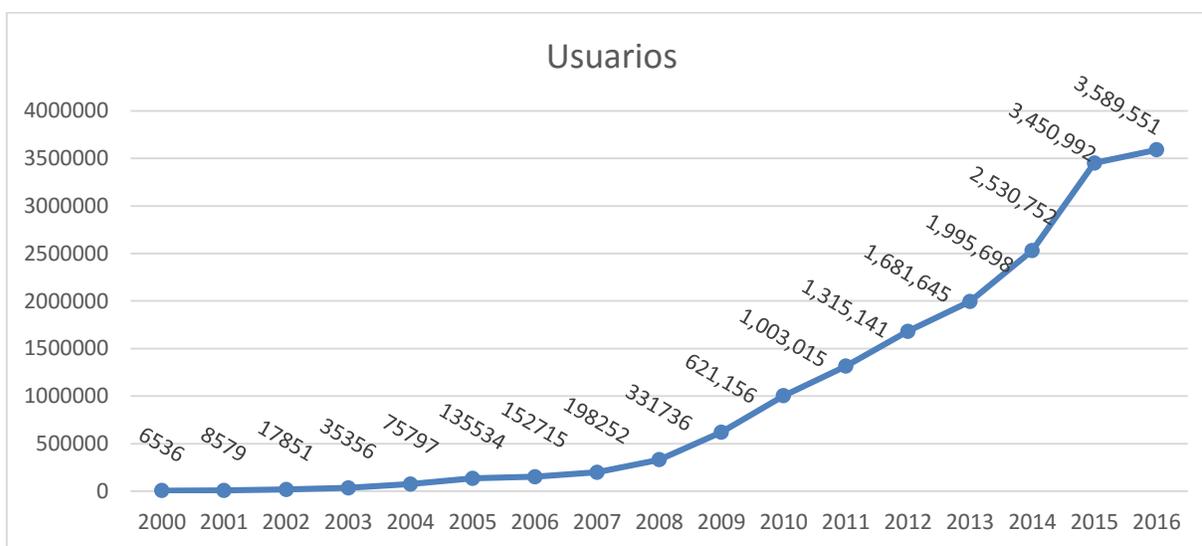


Figura 1.2 Usuarios móviles en Cuba hasta marzo 2016. Elaboración propia.

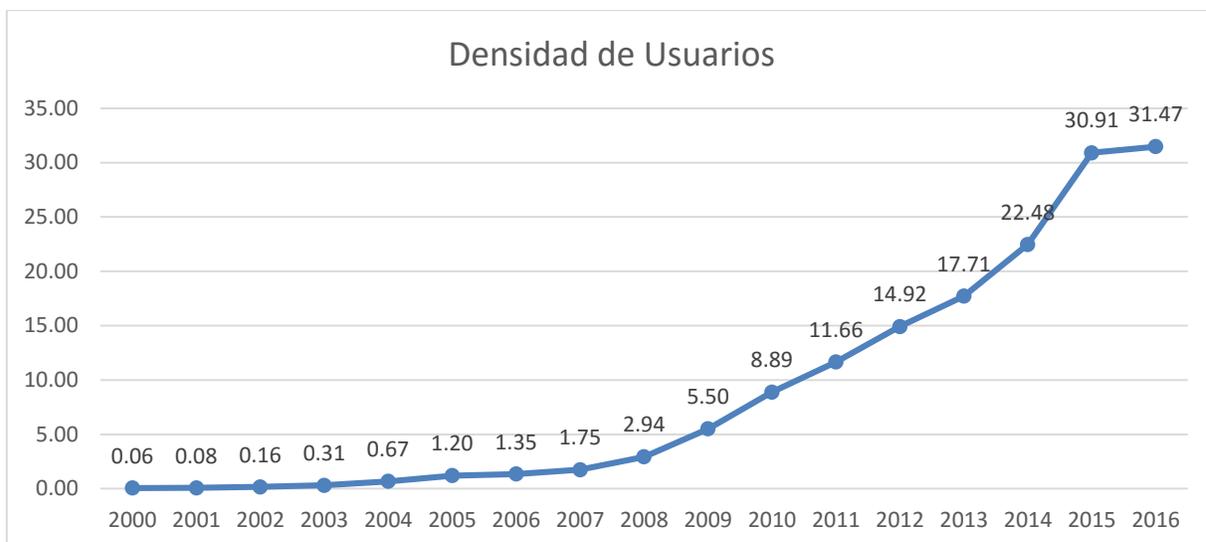


Figura 1.3 Penetración de usuarios móviles hasta marzo 2016. Elaboración propia.

1.3 Principios de Evolución y Expansión.

Desde la perspectiva de un usuario de un sistema de comunicaciones móviles, éste contrata el acceso a una serie de servicios, con capacidad de movilidad y sobre una cierta extensión geográfica, a los que asocia un cierto nivel de calidad a nivel cualitativo y/o cuantitativo. Desde la perspectiva del operador de la red, éste debe realizar un ejercicio de dimensionado de red con el fin de satisfacer la demanda agregada del conjunto de usuarios del sistema. Se considera una densidad de usuarios U [usuarios/Km²], cada uno de ellos generando en términos medio un tráfico T [bits/s/usuario]. Para satisfacer esta demanda, considérese que el operador tiene asignado a una estación base dada, un ancho de banda B [Hz], que pretende explotar mediante una tecnología caracterizada por una cierta eficiencia espectral E [bits/s/Hz]. Una estación base tiene capacidad para cubrir una superficie S [Km²], así, la capacidad desplegada por el operador es $B * E / S$ [bits/s/Km²]. El dimensionado adecuado corresponde al caso en que la capacidad desplegada por el operador permite cubrir la demanda de tráfico de los usuarios, esto es, cuando:

$$B * E / S = U * T \quad (1.1)$$

Donde:

U : Densidad por usuarios [usuarios/Km²].

T : Tráfico promedio por usuario [bps/usuario].

B : Ancho de banda [Hz].

E : Eficiencia espectral [bps/Hz].

S : Superficie cubierta por la estación base [Km²].

A partir de la igualdad anterior, se desprende que el aumento de la demanda (por la incorporación de un mayor número de usuarios – aumenta U – y/o por el aumento en el uso de las comunicaciones móviles por ejemplo con la incorporación de nuevos servicios –aumenta T – requiere de una respuesta

por parte del operador para satisfacer dicha demanda. El equilibrio podría restablecerse: aumentando B, esto es, accediendo a una mayor cantidad de espectro radioeléctrico, aumentando E, esto es, utilizando una tecnología espectralmente más eficiente o reduciendo S, esto es, desplegando un mayor número de estaciones base para reducir la superficie cubierta por cada una de ellas.

La opción más factible a corto plazo es reducir S, ya que el aumento de B tiene latencias de orden de magnitud de años debido al impacto regulatorio, y el aumento de E tiene en muchos casos impacto a nivel de estandarización, cuyas latencias también son del orden de magnitud de años. No obstante, la movilidad de los usuarios termina por imponer un límite en el tamaño mínimo que puede tener una célula. En esta situación, se diría que la red móvil ha llegado a su límite de capacidad, y los incrementos de demanda deberían satisfacerse a través de cambios regulatorios que permitieran la asignación de mayor cantidad de espectro (aumentar B) y/o el desarrollo y despliegue de nuevas tecnologías que permitieran mejorar la eficiencia espectral ofrecida por las existentes (aumentar E).

El operador de red móvil puede expandir la capacidad de la red a través del despliegue de un mayor número de estaciones base, la disponibilidad de mayor cantidad de espectro o el uso de una tecnología más avanzada. La variable escogida dependerá tanto de la viabilidad y flexibilidad que ofrezcan cada una de ellas, así como de consideraciones económicas. Por ejemplo, si un operador pudiera acceder a mayor cantidad de espectro con un costo bajo de las licencias, ésta podría resultar sin duda la opción más atractiva para el operador. Por el contrario, si resultara que el costo de las licencias para la operación en nuevas bandas de frecuencias fuera muy elevado, podría resultarle más interesante explotar una nueva tecnología sobre las bandas que ya tuviera asignadas, siempre que la regulación lo permitiera.

En términos de despliegue de red, un aumento progresivo de la demanda se cubre con un aumento progresivo de estaciones base. De manera simplificada, podría decirse que, para unos valores de U [usuarios/Km²], T [bits/s/usuario], B [Hz] y E [bits/s/Hz] dados, el área de cobertura de una célula debería ser $S = B * E / U * T$ [Km²] [2].

1.3.1 Cobertura y Velocidad de Transmisión.

La teoría de Shannon establece la capacidad máxima que puede obtenerse en la transmisión desde un elemento transmisor hasta otro receptor a través de un canal de comunicaciones afectado por ruido gaussiano:

$$C = B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = B \times \log_2 \left(1 + \frac{E_b}{N_0} * \frac{R_b}{B} \right) \geq R_b \quad (1.2)$$

Donde B es el ancho de banda y S/N la relación señal a ruido. A su vez, la potencia de señal recibida S se relaciona con la energía del bit E_b a través de la velocidad de transmisión R_b, mientras que la potencia de ruido N se relaciona con la densidad espectral de potencia de ruido N₀ a través del ancho de banda B.

Por otra parte, la potencia recibida S resulta de la potencia empleada en el transmisor P_t una vez que ha sufrido las pérdidas de propagación L(d), que dependen de la distancia d existente entre el transmisor y el receptor:

$$E_b = \frac{P_T}{R_b * L(d)} \quad (1.3)$$

Combinando las expresiones anteriores y expresándolo directamente en escala logarítmica se obtiene:

$$L(d)[dB] \leq P_T[dBm] - N_0[dBm/Hz] - 10 \log([2^{R_b/B} - 1] * B) \quad (1.4)$$

Así pues, suponiendo una cierta densidad espectral de potencia de ruido dada N_0 y una potencia disponible en el transmisor limitada P_t , las pérdidas máximas de propagación tolerables (y con ello el radio y la superficie cubierta por la célula S [Km^2]) se reducen en mayor o menor medida según el ancho de banda disponible B y la velocidad de transmisión R_b de acuerdo con el último término de la expresión anterior.

1.3.2 Redes de Múltiples Tecnologías de Acceso.

Los sistemas 3GPP abarcan la especificación del equipo de usuario y de una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal y una de red de acceso como se muestra en el Anexo IX. Respecto a la red de acceso, 3GPP ha especificado tres tipos de redes de acceso diferentes: GERAN (*GSM/EDGE Radio Access Network*), UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y E-UTRAN (*Evolved UTRAN*). Las redes de acceso GERAN y UTRAN pertenecen a los sistemas 3G UMTS mientras que E-UTRAN es la red de acceso de LTE. Cada red de acceso define su propia interfaz de radio para la comunicación con los terminales: GERAN TDMA, UTRAN WCDMA y E-UTRAN OFDMA. La red troncal se divide lógicamente en un dominio de circuitos CS, un dominio de paquetes PS y un subsistema IP multimedia. El dominio CS alberga todas las entidades que participan en la provisión de servicios basados en conmutación de circuitos, a los que se les asignan recursos de forma dedicada en el momento del establecimiento de la conexión, manteniéndose hasta la finalización del servicio, se accede a través de GERAN y UTRAN, el diseño E-UTRAN no contempla el acceso al dominio CS, todos sus servicios se proporcionan a través del dominio PS. El dominio PS incluye las entidades que proporcionan servicios basados en conmutación de paquetes. Existen dos implementaciones del dominio PS, GPRS y EPC. GPRS es la implementación que se desarrolló inicialmente en el contexto de las redes GSM y UMTS. EPC es la nueva especificación del dominio PS desarrollada en el contexto del sistema LTE, y constituye una evolución de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los terminales a través de E-UTRAN. El dominio EPC ha sido concebido también para soportar el acceso a los servicios de conectividad IP desde otras redes de acceso 3GPP y no 3GPP. La arquitectura completa de la familia de estándares 3GPP se proporciona en la especificación descrita en [11].

El despliegue de LTE trae consigo la operación de una nueva tecnología, aumentando así el grado de heterogeneidad ya existente hoy en día en los escenarios típicos de comunicaciones móviles. Así, LTE coexistirá con las redes GERAN y UTRAN. La explotación de la heterogeneidad de redes de acceso radio requiere lógicamente de la capacidad de interoperatividad entre las mismas. Por otro lado, con el nacimiento de UMTS se despertó un gran interés en el estudio de las ganancias que podrían alcanzarse con la explotación conjunta de los recursos de radio correspondiente a redes heterogéneas, a través de los denominados mecanismos de gestión común de los recursos de radio (CRRM, *Common Radio Resource Management*). En este sentido, las estrategias de selección de red y *handover* vertical entre redes GERAN/UMTS permiten conseguir mejoras de capacidad significativas [2]. No obstante, cuando

las redes heterogéneas incluyen redes de alta velocidad como HSPA y en mayor medida LTE, la ganancia de capacidad debida a la explotación conjunta de las redes deja de ser un elemento destacable, ya que la gran diferencia de prestaciones entre las distintas redes hace que el aporte de las redes GERAN/UMTS sea poco significativa. Ello puede entenderse fácilmente a partir del siguiente ejemplo: considérese la función clásica Erlang B para evaluar la capacidad C1 soportada por el Sistema #1 que dispone de M1 canales con una cierta probabilidad de bloqueo, PB. Considérese el Sistema #2 con M2 canales y la misma probabilidad de bloqueo, soportando una capacidad C2 en el mismo escenario. En caso de que este escenario de redes heterogéneas se explotara sin capacidad de interoperación entre las redes, la capacidad total alcanzable sería $C = C1 + C2$, con $C1 = \text{Erlang B}(M1, PB)$ y $C2 = \text{Erlang B}(M2, PB)$. Por el contrario, si las redes tuvieran la facilidad de interoperación entre ellas, la capacidad alcanzable sería $C = \text{Erlang B}(M1+M2, PB)$. La Figura 1.4 muestra el incremento del tráfico ofrecido que se consigue con una gestión conjunta de los recursos de radio con respecto a una gestión independiente para cada red, esto es:

$$G = \text{Erlang B}(M + M2, PB) - [\text{Erlang B}(M1, PB) + \text{Erlang B}(M2, PB)] \quad (1.5)$$

Observando el comportamiento del incremento del tráfico con respecto al número de recursos utilizados cuando se maneja la red de manera conjunta, es posible decir que posee una tendencia logarítmica creciente definida en la ecuación (1.6), en la que se demuestra que con el incremento de los recursos utilizados crece el tráfico ofrecido de manera conjunta con respecto al tráfico ofrecido de manera independiente.

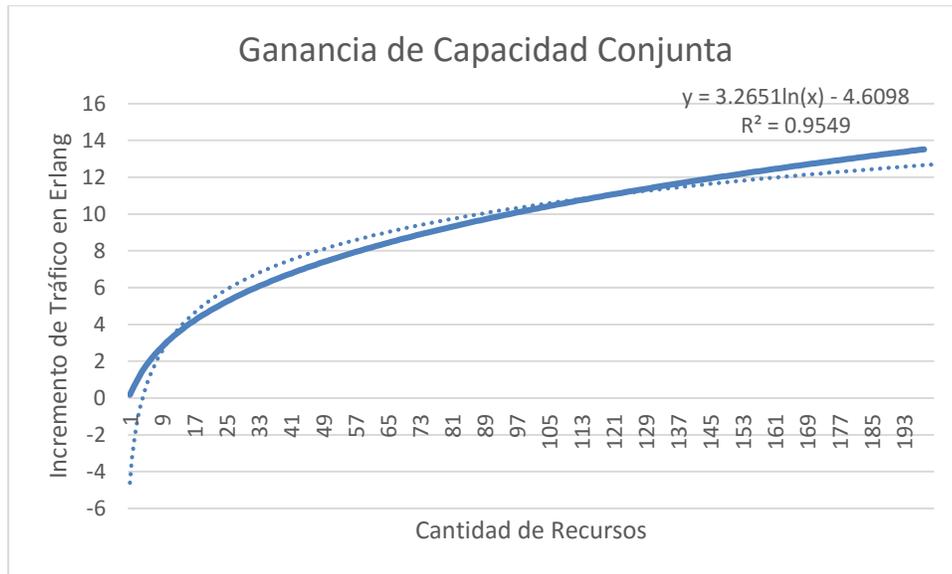


Figura 1.4. Ganancia de capacidad conjunta respecto a gestión independiente. Elaboración propia

$$y = 3.2651 \ln(x) - 4.6098 \quad (1.6)$$

En cualquier caso, y aunque como se ha ilustrado la ganancia de CRRM en términos de capacidad esperable es discreta, la explotación de la heterogeneidad de las redes sigue siendo un aspecto de gran importancia en el marco del despliegue LTE. En efecto, por una parte, las redes tradicionales pueden seguir cursando tráfico asociado a diferentes servicios y así continuar la amortización de las inversiones en estas redes, de manera similar a lo ocurrido en su momento con el despliegue de UMTS

y la continuidad en el uso de la red GSM para cursar tráfico de voz. Por otro lado, el hecho de que las redes tradicionales ya proporcionen cobertura extensa en el territorio, con disponibilidad ubicua de voz con GSM/UMTS y datos con HSPA, permitirá un despliegue más flexible de los eNB de LTE, centrándose al menos inicialmente en la provisión de cobertura en zonas densas.

1.4 Sistema LTE.

Las motivaciones más importantes de LTE son la necesidad de asegurar la continuidad de la competitividad de los sistemas 3G para el futuro, la demanda de usuarios para altas razones de datos y calidad de servicio, la continua demanda para la reducción de costos de inversión y operación, la baja complejidad de la arquitectura, y la posibilidad de evitar fragmentación de tecnologías para agrupar o separar la banda de operación [1].

A partir de un análisis de la arquitectura genérica adoptada por los sistemas celulares 2G/3G actuales es posible identificar las piezas fundamentales que componen la arquitectura de red de toda la familia de sistemas especificada por el 3GPP (GSM, UMTS, LTE). Esta identificación permite conocer bajo qué criterios se conciben los nuevos componentes introducidos por el sistema LTE respecto a las redes GSM y UMTS.

La arquitectura del sistema LTE se diseñó en base a tres requisitos fundamentales: reducción de costos, baja latencia y la necesidad de usar únicamente conmutación de paquetes. Para conseguir esto se planteó una estructura plana, sin nivel jerárquico y con la menor cantidad de nodos e interfaces posibles. La arquitectura de este sistema comprende una nueva red de acceso denominada E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y un nuevo dominio de paquetes EPC (*Evolved Packet Core*) de la red troncal. La combinación de estas dos redes recibe el nombre de EPS (*Evolved Packet System*).

Una representación de la arquitectura del sistema LTE, denominada formalmente como sistema evolucionado de paquetes (EPS, *Evolved Packet System*), se puede observar en la Figura 1.5, y sus componentes básicos son: equipo de usuario, red de acceso (E-UTRAN) y red troncal (EPC).

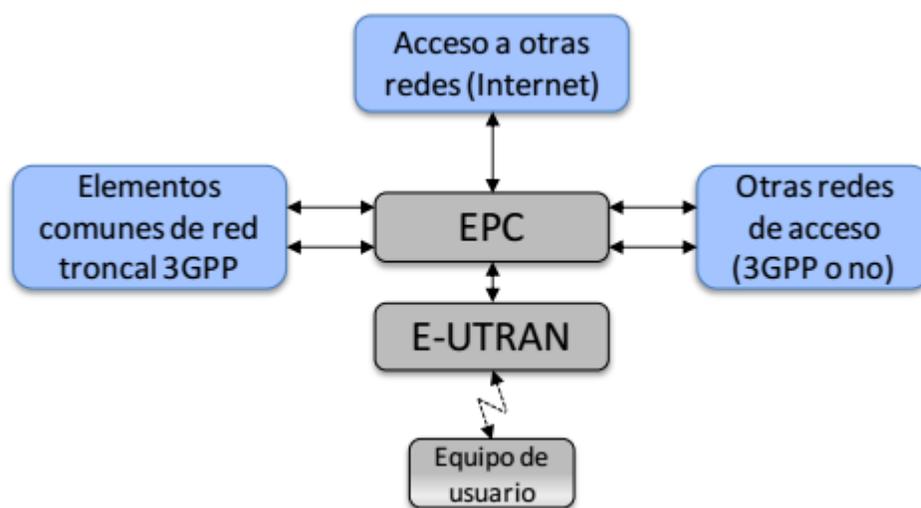


Figura 1.5. Arquitectura del sistema LTE. Tomado de [2].

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

La arquitectura de la red de acceso E-UTRAN se compone de una única entidad de red denominada *evolved NodeB* (eNB) que es la estación base de E-UTRAN. Esta estación base integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso GSM y UMTS compuestas por estaciones bases y equipos controladores. La arquitectura de E-UTRAN se detalla en las especificaciones descritas en [12].

En la Tabla 1.2 se resumen las entidades de red e interfaces de E-UTRAN.

Tabla 1.2. Entidades de red e interfaces de E-UTRAN. Elaboración propia.

Entidades de red	Denominación	Descripción
		Evolved NodeB
Interfaces	Denominación	Entidades de red asociadas
	E-UTRAN Uu	eNB UE
	X2	eNB eNB
	S1-MME	eNB Red Troncal EPC (MME)
	S1-U	eNB Red Troncal EPC (S-GW)

Los protocolos usados en las tres interfaces se estructuran en torno a un plano de control y un plano de usuario. El plano de control abarca los protocolos utilizados para el envío del tráfico (paquetes IP) correspondiente a los servicios a los que acceden los terminales a través de la red. El plano de control se refiere a los protocolos necesarios para sustentar las funciones y procedimientos en las diferentes interfaces.

El sistema LTE fue diseñado con la idea de incrementar, en gran medida, las capacidades que ofrecían las anteriores generaciones de comunicaciones móviles. Introduce gran variedad de modificaciones, pero quizá la más novedosa es la de ofrecer todos los servicios del sistema, incluida la voz soportada sobre IP, dejando atrás la conmutación de circuitos para pasar a un nuevo sistema basado completamente en conmutación de paquetes.

Algunas novedades de este sistema son: velocidades de 100 Mbps en bajada y 50 Mbps en subida, modulaciones de alta eficiencia espectral 64 QAM, bajas latencias en plano de usuario y señalización inferiores a 10 ms, arquitectura plana basada en protocolo IP, técnicas de acceso OFDMA en bajada y SC-FDMA en subida, canalizaciones flexibles de 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz, introducción de elementos MIMO, y reducción de costos por bits para el operador y el usuario.

1.4.1 Arquitectura para la Conexión de E-UTRAN con una Red de Acceso 3GPP.

Funcionalmente, E-UTRAN, UTRAN y GERAN, proporcionan servicios de conectividad muy similares, especialmente cuando se mira la situación desde el punto de vista del usuario final, donde la

única diferencia puede ser la velocidad de datos diferentes y un mejor rendimiento, pero en su arquitectura estas redes de acceso son bastante diferentes, y muchos aspectos se llevan a cabo de manera distinta. Hay, por ejemplo, grandes diferencias en cómo los portadores se gestionan en el EPS en comparación con las redes existentes con acceso UTRAN o GERAN. Sin embargo, cuando UTRAN o GERAN están conectadas al EPC, el S-GW simplemente asume el papel del GGSN (*Gateway GPRS Support Node*). Por tanto, redes de acceso 3GPP se comportan prácticamente de la misma manera a como se comportaban antes de trabajar conjuntamente. Las diferencias se hacen más visibles en el EPC, ya que lo que solía ser un GGSN fijo es ahora el S-GW que puede ser cambiado al producirse un cambio de SGSN debido a la movilidad de un UE. El EPC necesita la adición de interfaces y nuevas funciones para conectarse y trabajar con redes de acceso UTRAN y GERAN. Las nuevas interfaces son S3, S4 y S12 (ver Anexo XI).

El eNB no interactúa directamente con las otras redes de acceso 3GPP, y la interacción hacia el EPC es la misma que en otros casos de movilidad que implique al EPC. Sin embargo, optimizar la interconexión significa que la red está controlando eventos de movilidad, tales como *handovers*, y está provista de la funcionalidad de traspasar la comunicación con una mínima interrupción de los servicios. Esto significa que un eNB debe ser capaz de coordinar la medición de células UTRAN y GERAN por parte del UE, y llevar a cabo las decisiones de *handovers* basadas en resultados de la medición; y por lo tanto los protocolos de interfaz radio E-UTRAN han sido diseñados para soportar estas nuevas funciones. Funcionalidades similares se requerirán de UTRAN y GERAN para soportar los *handovers* hacia la red E-UTRAN.

1.4.2 Tecnologías a Nivel Físico.

OFDMA

La técnica de acceso múltiple OFDMA utilizada en el enlace descendente del sistema LTE ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto, permite alojar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes.

OFDMA es la versión multiusuario de OFDM. Se utiliza para lograr que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones pueda compartir el espectro. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios.

El acceso múltiple OFDMA permite realizar una planificación frecuencial oportunista, que consiste en que, en cada intervalo de tiempo de transmisión (TTI, *Time Transmission Interval*), se asigna cada sub-banda (grupo de subportadoras) del espectro disponible a aquel usuario cuyo canal presente mejor SNR en esa sub-banda. De esta forma se maximiza el *throughput* global de la celda.

Para conseguir una mayor eficiencia, el sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente la interferencia co-canal y los desvanecimientos rápidos, proporcionando mejor eficiencia espectral del sistema que OFDM. Este método de acceso permite asignar un grupo diferente de subportadoras a cada uno de los usuarios, garantizando así, una calidad de servicio (QoS) en función del ancho de banda asignado. Es decir, OFDMA permite establecer una velocidad de conexión y una

probabilidad de error individualmente para cada usuario. Podemos entenderlo como una combinación del OFDM con TDMA (acceso múltiple de división de tiempo), multiplicándonos diferentes usuarios mediante un acceso por división en tiempo. OFDMA se puede también describir como un acceso donde repartimos los recursos en el espacio formado por el eje temporal y el eje frecuencial. Se asigna la información a lo largo de las subportadoras en la combinación del dominio frecuencial y el acceso múltiple en el dominio temporal (espacio tiempo-frecuencia). OFDM es un esquema de modulación, mientras que OFDMA es un esquema de modulación y de acceso (ver Anexo XII).

SC-FDMA

En LTE se utiliza la técnica OFDMA para el enlace descendente. Esta técnica presenta una mala relación potencia promedio a pico (PAPR, *Peak to Average Power Ratio*), no obstante, ese problema se soluciona con amplificadores de alta linealidad, aunque esto requiera el consumo de más potencia. Sin embargo, en el terminal del usuario es crítico reducir el consumo de potencia, por lo que se utiliza una técnica de acceso de portadora única.

Básicamente lo que se hace en SC-FDMA es que los símbolos en el dominio del tiempo se convierten al dominio de la frecuencia usando la DFT; una vez en el dominio de la frecuencia son mapeados a la localización deseada dentro del canal de banda ancha antes de ser convertidos de nuevo al dominio del tiempo usando iFFT. Finalmente, se inserta el prefijo cíclico. Esta técnica de modulación híbrida, combina la robustez frente a la propagación multirrayecto, y la flexibilidad de ubicación de las subportadoras propia de los sistemas OFDM con menor PAPR, propia de las modulaciones con portadora única. Esta tecnología además reduce el nivel de los picos de potencia en el dominio del tiempo, pero aumenta la potencia radiada fuera de banda en el dominio frecuencial. También genera una pérdida de sensibilidad entre 2 y 3 dB en canales con desvanecimientos. Finalmente, resulta de interés mencionar que esta técnica permite dos modos de mapeo de las subportadoras. Uno de ellos es el modo localizado, el cual hace que los usuarios tengan subportadoras contiguas. Este es el modo de operación elegido para LTE.

1.4.3 Capa Física.

La capa física del sistema LTE está diseñada para que opere en las bandas de UHF, es decir, por encima de los 450 MHz y hasta los 3,5 GHz. El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación para trabajar en modo FDD o TDD. Los posibles esquemas de modulación son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Los anchos de banda soportados en la capa física se muestran en el Anexo XVIII.

Bloque de Recurso Físico

Se denomina bloque de recurso físico (PRB, *Physical Resource Block*) al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa 180 kHz de ancho de banda, equivalente a 12 subportadoras equiespaciadas 15 kHz. En él se transmiten 6 o 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico. La duración de un PRB es de 0,5 ms, es decir, la duración de un slot o ranura de tiempo.

El número de portadoras disponibles está relacionado con el número de PRB de cada canal. Por lo tanto, el número de subportadoras es 12 veces el número de PRB más una, ya que se considera la subportadora central, que no se utiliza para transmitir información.

En un PRB se tienen como máximo 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, por lo que tenemos en total 84 recursos donde introducir los símbolos QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Considerando la modulación de mayor eficiencia espectral, 64-QAM, en la que se transmiten 6 bits/símbolo, dentro de un PRB podremos enviar un total de 504 bits cada 0,5 ms, lo que nos ofrece una velocidad bruta de transmisión pico de aproximadamente R_b , $PRB=504 \text{ bits}/0,5 \text{ ms} \approx 1 \text{ Mb/s}$ [11]. Ver Tabla 1.3. El 15% de los recursos es destinado a control y señalización.

Tabla 1.3. Velocidades máximas en función de la canalización. Elaboración propia.

Canalización (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Velocidad Pico Total (Mb/s)	6	15	25	50	75	100
Velocidad Pico Bruta por Usuario (Mb/s)	5.1	12.8	21	42.5	63.7	85

A diferencia de otros sistemas móviles como GSM o UMTS, el estándar LTE no contempla el uso de canales dedicados sino compartidos. Es decir, sólo se establecen cuando un usuario debe recibir datos destinados a él. Además de los canales dedicados a la transmisión de datos por parte del usuario, para permitir una transmisión eficiente de esta información se necesitan los denominados canales físicos de control, que son los encargados de transportar una determinada señalización. En la recomendación ITU-R M.1035 se define la estructura de los canales en LTE así como tipos de celdas [13].

1.4.4 Reutilización de Frecuencias.

El esquema de acceso radio de LTE proporciona ortogonalidad entre los usuarios de una misma celda, tanto en el enlace ascendente como descendente. En general, y por ese motivo, las prestaciones de LTE en términos de eficiencia espectral y tasas de transmisión pico están más limitadas por las interferencias provenientes de celdas vecinas en comparación con lo que sucedía en las tecnologías de tercera generación (3G). Por lo tanto, cualquier técnica que permita reducir las interferencias entre celdas se traducirá en una mejora en las prestaciones del sistema LTE en términos de calidad de servicio que se pueda ofrecer a usuarios en los límites o bordes de las celdas.

La coordinación de interferencias entre celdas (ICIC, *Inter-cell Interference Coordination*) es una técnica mediante la cual se controla el nivel de interferencia que reciben los usuarios en los bordes de las celdas para mejorar parámetros de calidad de servicio, en particular, su tasa de transmisión. Esta técnica implicará aplicar ciertas restricciones en el dominio de la frecuencia, tanto en el enlace ascendente como descendente, configurando el equivalente a esquemas de reuso en frecuencias distintas para el interior y el exterior de las celdas como se muestra en el Anexo XVI.

1.5 Propuestas de Procedimientos para el Dimensionamiento LTE.

Para el dimensionamiento de redes de acceso LTE se aprecian en la literatura científica diferentes propuestas y criterios que pueden ser analizados con el fin de concebir un planeamiento en concordancia con soluciones y perspectivas coherentes. Por ejemplo en [14] el enfoque ha sido el modelado del costo total y la capacidad en grandes sistemas con múltiples tecnologías de acceso. En este caso han sido desarrollados dos métodos heurísticos para el dimensionamiento del sistema, uno basado en la capacidad promedio y otro en simulaciones de la red de radio. Con el dimensionamiento basado en la capacidad promedio un tipo de estación base es descrita por un costo total medio, un

rango máximo y un rendimiento total. La demanda de tráfico es descrita por el rendimiento agregado por unidad de área. La calidad de servicio resultante en términos de corte, bloqueo, velocidades, así como pérdidas de trayecto e interferencia cocanal son parámetros externos. Además, se usa un método heurístico para determinar el número de estaciones bases que se necesitan para servir un mapa de tráfico dado. Las clases de estaciones bases consideradas son desarrolladas una a una en orden decreciente del máximo rango soportado. Para cada clase de estación base el tráfico servido es removido del mapa de tráfico en orden creciente al tráfico ofrecido por unidad de área. Por tanto, el tráfico residual que ha sido servido con otra clase de estación base pertenecerá primeramente a elementos de tráfico con alta densidad. Para cobertura fraccional los elementos de tráfico se ordenan basados en el costo por bit. De esta manera es posible rápidamente estimar el costo total medio de una red heterogénea incluyendo inversiones y gastos de operación como una función de rendimiento del área o del volumen de tráfico.

En el modelo refinado se usa la simulación estática de la red de radio para estimar las dimensiones de las redes heterogéneas. Una medida típica del desempeño puede ser el máximo rendimiento de área medio que es factible sujeto a que alguna razón media de datos pueda ser ofrecida con cierta probabilidad de interrupción. Para el desarrollo de una red ya establecida la ubicación de las estaciones bases complementarias se determinan de forma iterativa en base a la probabilidad de interrupción en la vecindad donde se localiza cada sitio candidato. La velocidad media de datos experimentada en diferentes posiciones de usuarios ocurre para cada instantánea estimada. Los usuarios tienen acceso a todas las tecnologías de radio y se asignan a estaciones bases de una en una en un orden decreciente de tasa de datos máxima esperada del enlace descendente mínimo esperado asumiendo plena carga. Antes de que se conecte un usuario se comprueba que la asignación es factible para el usuario de interés, así como los usuarios admitidos anteriormente. La velocidad de datos instantánea se aproxima como una función de la relación señal a interferencia más ruido media. Multiplicando la potencia de la señal recibida con la carga generada por el transmisor correspondiente, sólo la potencia media recibida se tiene en cuenta en los cálculos de interferencia. Esto no sería correcto para, por ejemplo, los sistemas de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), pero es lo mejor para facilitar las evaluaciones de la capacidad media en el enlace ascendente. A pesar de que los tiempos no están modelados con precisión, este modelo es más preciso en comparación con el dimensionamiento de la capacidad promedio y pueden ser analizados los parámetros claves para un dimensionamiento de redes de radio heterogéneas.

En [15] se aborda el proceso de diseño dividido en dos partes, planeamiento y optimización. El concepto de planeamiento trata de encontrar la calidad en el desempeño de la red para una configuración dada, mientras que el proceso de optimización se refiere a la búsqueda de la configuración para la cual la calidad de la red es óptima.

El proceso de diseño puede ser implementado dependiendo del estado de desarrollo de la red como se muestra en el Anexo XX. El primer paso consiste en la definición de la red actual, donde se precisan diferentes criterios que incluyen la descripción del tráfico esperado, potencia, escenarios de desarrollo y requerimientos de capacidad del sistema. Entonces puede realizarse un primer ajuste manual de la red basado en la colección de datos, del modelo de propagación, etc.

La siguiente fase normalmente hace uso de una herramienta de cálculo de predicción del desempeño de la red para cada configuración con diferentes parámetros y altos costos de reconfiguración, como son la ubicación del sitio, el azimuth, y el *tilt*. La herramienta utilizada puede soportar modelos de tráfico,

propagación, y gestión de los recursos de radio (RRM, *Radio Resource Management*). El objetivo de esta herramienta es calcular los indicadores de desempeño (KPI, *Key Performance Indicator*) que representan la calidad de cierta configuración de red LTE. Las simulaciones de Monte Carlo son frecuentemente usadas en el diseño de estas redes debido a la alta carga computacional requerida por las simulaciones dinámicas donde se realizan cientos de procesos iterativos.

Otro ejemplo consiste en el dimensionamiento es el descrito en [16], donde se discute el algoritmo de asignación de potencia basado en la teoría de juegos, en el que el precio de la interferencia es intercambiado entre los usuarios. El precio de la interferencia significa que el usuario incrementa su potencia para incrementar su utilidad, haciendo sufrir así a sus vecinos por el aumento de la interferencia que provoca. La utilidad es definida como la calidad de servicio. El precio de la interferencia puede reflejar la interferencia entre usuarios [17]. Con el uso de la teoría de juegos la utilidad de los usuarios puede ser maximizada a través del ajuste de la interferencia entre los usuarios. En este algoritmo la potencia de los usuarios y el precio de la interferencia son actualizados de manera iterativa y asincrónica, y este algoritmo se nombra distribución de precios asíncrona (ADP, *Asynchronous Distributed Pricing*). En este trabajo se presenta un enfoque de la potencia de la estación base usando el método de reducción de interferencia ADP. Es conocido que los usuarios en el borde de la celda sufren fuertes interferencias y su razón de transmisión está determinada por la relación señal ruido. En este caso se usa el algoritmo de asignación de potencia para garantizar la máxima razón de transmisión durante la determinación de la potencia de una estación base. En este artículo se considera la distribución automática de las estaciones bases y la asignación de potencia. En un primer paso se utiliza el método de búsqueda de servicio para determinar la posición de la estación base y la potencia inicial, que se refiere a la potencia de transmisión de la antena si satisface la condición de que la estación base alcance cierta tasa de tráfico y las áreas de cobertura de la estación base no se solapen. En un segundo paso se usa el algoritmo ADP para asignar la potencia a la estación base con el incremento de la utilidad del usuario y su desempeño.

Para la posición de las estaciones bases se siguen los siguientes pasos:

- Poner el mayor radio para la estación base. Investigar el tráfico a partir de cierta posición, representada por las coordenadas de la estación base. En el área de cobertura de la celda si el tráfico es más pequeño que la carga máxima y mayor que la carga mínima se calcula la posición y las coordenadas deseadas.
- Si se satisface la condición 1, el tráfico que ha sido cubierto es removido de la región de planeamiento, de otra manera se repite 1.
- Si el tráfico cubierto no alcanza una cierta razón, se repite 1 con el uso de un menor radio.
- Cuando se satisfacen los requerimientos da velocidad o se alcanza el menor radio de la celda, la búsqueda y el algoritmo han finalizado.

Para la asignación de la potencia de la estación base la idea se sustenta en la teoría de juego en la que cada receptor está solamente interesado en la señal del transmisor que está en su celda, el resto de las señales provenientes de otros transmisores son consideradas interferencia. La función de utilidad se define como la calidad de servicio de cada usuario. Es posible decir que el usuario puede entonces aumentar su potencia de transmisión para incrementar su utilidad, esto hace que se incremente la

interferencia de los otros usuarios, y todos pueden repetir este procedimiento. El resultado es que cada transmisor usa su máxima potencia que se traduce en mayor interferencia y menor utilidad. El método mejorado es el algoritmo ADP que intercambia el precio de la interferencia entre los usuarios para maximizar la utilidad y reducir la interferencia y así llegar a un punto de equilibrio en el sistema en el que converge la utilidad y la potencia.

En [18] se considera el uso de un algoritmo que modifica el plan de asignación de frecuencias que propone la división del territorio en cuestión en zonas con diferentes bandas de frecuencia. Para el modelado del tráfico se acondicionan un grupo de parámetros que permiten obtener un dimensionamiento eficiente como son una cantidad de suscriptores de manera aleatoria con una densidad determinada cuyos usuarios tienen definidas ciertas velocidades. Para el dimensionamiento hacen uso de una herramienta de diseño propietaria ICS Designer [19].

En el trabajo de [20] se realiza una aproximación conservadora de la carga de la celda con el canal de Shannon y se aplica al dimensionamiento de redes de acceso LTE.

Otro procedimiento sugerido en la literatura científica que tiene como objetivo el planeamiento de la capacidad de tráfico dentro del dimensionamiento de la red de radio LTE se muestra en [21]. En este trabajo, se propone un procedimiento de planificación de la capacidad de la red de radio LTE basada en el diseño de un sistema de simulación para la obtención de un resultado óptimo, teniendo en cuenta una información de tráfico específica. Incluye componentes claves de procesamiento unificado de tráfico, adaptación de la interfaz de aire flexible, la simulación, evaluación y optimización. Para la simulación de la interfaz de aire, el modelado probabilístico de interferencia y la asignación de usuarios transforman la simulación de múltiples celdas en la simulación de una sola celda, manteniendo las características del sistema, con la dramática reducción de la complejidad de la simulación.

En LTE las estrategias iniciales de planeamiento de la red son esenciales para garantizar un rendimiento mínimo apropiado en el extremo de la celda y con ello la garantía de los requerimientos mínimos de servicio. El rendimiento de los usuarios en el enlace de subida es afectado mayormente por la interferencia en banda la cual es generada por las celdas vecinas. El algoritmo *MAC Scheduler* es la función que asigna los PRB en la interfaz de aire a los diferentes usuarios cada TTI. En [22] se propone un algoritmo de planeamiento de la celda en el enlace de subida que utiliza un modelo matemático basado en la teoría de colas para predecir la interferencia en general. Usando este modelo es posible ajustar dinámicamente las predicciones y garantizar los rendimientos en el borde de las celdas en el enlace de subida.

Un modelo analítico para el dimensionamiento de redes basadas en OFDMA como lo es LTE es propuesto en [23]. En tal sistema los usuarios requieren un número de subcanales que dependen de su relación señal ruido, y, por tanto, de su posición. El sistema está sobrecargado cuando el número de subcanales requeridos es mayor que el número de subcanales disponibles. Se ofrece una expresión de probabilidad de pérdida y un método algorítmico para obtener el número de subcanales que garantiza una probabilidad de pérdida inferior al umbral dado. Se demuestra que la aproximación de *Gauss* conduce a valores optimistas y por tanto inutilizables. Se introducen entonces las expansiones de Edgeworth y se muestra que al elegir el orden correcto de la expansión se puede tener un valor aproximado de dimensionamiento, aunque fácil de computar con un rendimiento garantizado. Como el valor obtenido es altamente dependiente de los parámetros del sistema, lo que resulta ser bastante

indeterminado, se provee un procedimiento basado en la concentración desigual de las funciones de *Poisson*.

Las expansiones de Edgeworth son series que aproximan una distribución de probabilidad en términos de sus cumulantes. Las series son las mismas, pero el orden de sus términos varía y por consiguiente su exactitud para truncar la serie. La idea fundamental de las expansiones de Edgeworth es escribir una función característica como función de densidad de probabilidad que se aproxime en términos de la función característica de una función de distribución con propiedades conocidas para recuperar la función inicial mediante la inversa de la transformada de Fourier [24].

En [25] se define un modelo matemático para el dimensionamiento de LTE *Release 8*. Luego de describir los mecanismos que influyen en el dimensionamiento tales como el de planificación y *QoS*, se precisan las estrategias de planeamiento y la función objetivo que garantiza minimizar el número de estaciones bases a utilizar. La formulación matemática del modelo conduce a un problema lineal mixto. El método definido en [26] es usado para resolver este problema.

Las redes LTE, como cualquier otra, deben ser planeadas, para así evitar un ineficiente uso del espectro y garantizar una calidad de servicio a los usuarios. En [27] se define un algoritmo para el planeamiento de una red LTE en un área urbana, se especifican un grupo de parámetros y todos los cálculos se realizan usando el *software* ICS Telecom [19].

Los sistemas celulares de cuarta generación están orientados a incrementar la capacidad de soportar servicios y contenidos diversos de internet. En [28] se maneja el problema de capacidad en el planeamiento de una celda LTE. El esquema de reutilización suave de frecuencias (*SFR*, *Soft Frequency Reuse*) es considerado aquí como una aproximación interesante para el uso eficiente del ancho de banda en los sistemas LTE. Con *SFR* la celda es dividida en dos partes, una parte central y una parte exterior utilizando diferentes esquemas de reúso. Sobre la base de un modelo de pérdida de trayecto adecuado, se caracteriza la relación señal interferencia más ruido, lo que genera la posibilidad de utilizar diferentes modos de transmisión en una celda con *SFR*. Esto permite evaluar la capacidad que puede alcanzar una celda con *SFR*. La optimización de la capacidad celular se lleva a cabo por medio de extensos resultados numéricos con el fin de seleccionar tanto el radio de la región central de la celda como la relación de potencia de borde a centro.

La ubicación óptima de una estación base en un sistema LTE no es una tarea fácil debido a la cantidad de factores que deben ser tomados en cuenta. La creciente demanda de capacidad geográficamente no homogénea, se ha convertido en el factor limitante fundamental durante el proceso de planeamiento de la red. Otros elementos contribuyentes con esta limitante son la presencia de nodos de retrasmisión y la existencia de celdas mixtas. En [29] se describe el problema de optimización para los sistemas LTE y como resultado la propuesta de un algoritmo de optimización combinatorio. El análisis de la optimización está basado en cobertura, capacidad y criterios de costo.

Las redes inalámbricas con altas razones de datos y soporte de movilidad se han convertido en parte integral del acceso de banda ancha ubicuo. El dimensionamiento adecuado de las redes de acceso inalámbricas es esencial para satisfacer los requerimientos de calidad de servicio de los usuarios. Una vez dimensionada la red, pueden existir variaciones dinámicas en el tráfico y en la distribución poblacional que pueden afectar la capacidad de la red para ofrecer una adecuada calidad de servicio. Consecuentemente el redimensionamiento de la red puede ser necesario. Recientes investigaciones no discuten el efecto de los esquemas de calidad de servicio en la capacidad de la red. En [30] se investiga

el impacto de los esquemas de calidad de servicio en la capacidad de la red. El objetivo es determinar la capacidad de la red de acuerdo a variaciones demográficas del área cubierta y el perfil de tráfico de los usuarios con un esquema de calidad de servicio que incluye control de congestión y control de admisión. Se presentan diferentes escenarios para evaluar el efecto de los esquemas de calidad de servicio en la capacidad de la red. Esto permite a los operadores determinar el punto para el cual la red necesita ser redimensionada.

El desempeño eficiente de una red LTE se basa en la selección de la frecuencia, dentro de la banda de trabajo de la celda, tomando en cuenta todos los factores potenciales que pueden afectar a la misma. La radio cognitiva es adoptada en este proceso y se dirige hacia la maximización de la utilización del espectro. En [31] se propone un esquema eficiente para el planeamiento de la red mediante el empleo de técnicas de censado del espectro. De la información espectral recogida por varios dispositivos sensores es posible escoger adecuadamente la frecuencia central dentro de la banda de operación con el objetivo de maximizar la calidad de la experiencia del usuario final. Los algoritmos tenidos en cuenta se implementan en el enlace descendente considerando una variedad de configuraciones y topologías (ver Anexo VII). En este trabajo los mecanismos implementados son evaluados en desarrollos reales y sus resultados se muestran en el Anexo XVII.

En [32] se ofrece una visión de desarrollo de LTE donde se identifican elementos esenciales en el proceso de planeamiento y de pruebas de desempeño de los servicios provistos. Basado en los resultados del planeamiento teórico se crean los escenarios de prueba y el desempeño de la red es evaluado usando un simulador de red. En el planeamiento de los recursos de una celda LTE se consideran dos fases importantes, el dimensionamiento de acuerdo al nivel de señal del enlace y de acuerdo a la capacidad de tráfico. El margen para el enlace de radio es considerado como una estimación de las pérdidas máximas de propagación entre el transmisor y el receptor en el enlace de subida y el enlace de bajada, y este resultado impone la distancia máxima a transmitir y por tanto las dimensiones de la celda. Consecuente con este razonamiento se define entonces el número de celdas necesarias para cubrir un área determinada. La segunda fase del planeamiento consiste en la asignación eficiente de los recursos considerando el número de suscriptores que serán atendidos, el tráfico que se genera y las razones de datos deseadas. El resultado fundamental de esta fase es el número de sitios que serán necesarios para soportar el tráfico de datos en el área de interés. Como el planeamiento de la red es un proceso iterativo, la configuración resultante del sistema se comprueba mediante un *software* de simulación donde se realizan cambios para maximizar la eficiencia. Además de la capacidad de la celda se tiene en cuenta el desempeño de las aplicaciones, donde se ofrecen ciertas consideraciones para varios tipos de tráfico.

En [33] se presenta una aproximación genérica para el dimensionamiento LTE. Como es lógico con el dimensionamiento se determinan la cantidad de sitios necesarios para cubrir un área determinada. Esta propuesta tiene en cuenta la densidad de usuarios, las suscripciones de servicios, la asignación de los recursos, y la mitigación de interferencia.

En [34] se propone un modelo para el planeamiento de red de acceso LTE que cuenta con múltiples periodos. El análisis de los resultados experimentales es presentado como un problema de programación lineal de entera mixta y permite obtener una solución desde el punto de vista práctico. La definición de múltiples periodos viene dada por la creación de la red que no ocurre de manera instantánea, sino que pasa por varios estados y de manera gradual pues se incrementa la capacidad y la

cobertura, así como la incorporación de nuevos servicios. Como un criterio de eficiencia se selecciona el máximo beneficio para el operador.

El empleo de agregación de portadoras hace que pequeños proveedores puedan mejorar la calidad de servicio que ofrecen. En [35] se determina el mínimo nivel de agregación de portadoras necesarias para poder competir con los grandes proveedores. Con este fin se utiliza la fórmula de Erlang-B para el establecimiento de un nivel óptimo de agregación de portadoras. La agregación de portadoras permite a los proveedores de servicios agregar portadoras continuas y no continuas hasta un total de 100 MHz, lo que mejora sustancialmente el desempeño de las redes LTE comparado con las especificaciones definidas en el *Release 8* del 3GPP donde el máximo ancho de banda soportado es de 20 MHz.

Para la estimación de la tasa efectiva de bits en el enlace de bajada en [36] se define un algoritmo basado en la distribución de los niveles de MCS para diferentes condiciones de carga. Este algoritmo es conveniente para la operación y útil en la guía para el planeamiento y la optimización de la red. Un planeamiento razonable de la capacidad de la red puede controlar el costo y la efectividad de la construcción de la misma, mientras que la tasa efectiva de bits es uno de los dos parámetros claves en el planeamiento LTE. La tasa efectiva de bits puede ser dividida en pico, promedio y de borde. Todo esto está influenciado por los recursos, la carga de red, la distribución de los usuarios, y los algoritmos de planificación. Existen dos métodos para calcular la tasa efectiva de bits, el primero basado en el ancho de banda físico y el segundo en el esquema de codificación y modulación en la capa MAC.

1.5.1 Criterios Generales de Dimensionamiento.

Luego de haber revisado en la bibliografía científica estos procedimientos para el diseño de redes de acceso LTE se pueden relacionar varios criterios como se observa en la Figura 1.6. Las investigaciones de manera general contienen perspectivas diversas y resuelven problemas relacionados con el diseño del acceso en las redes móviles.

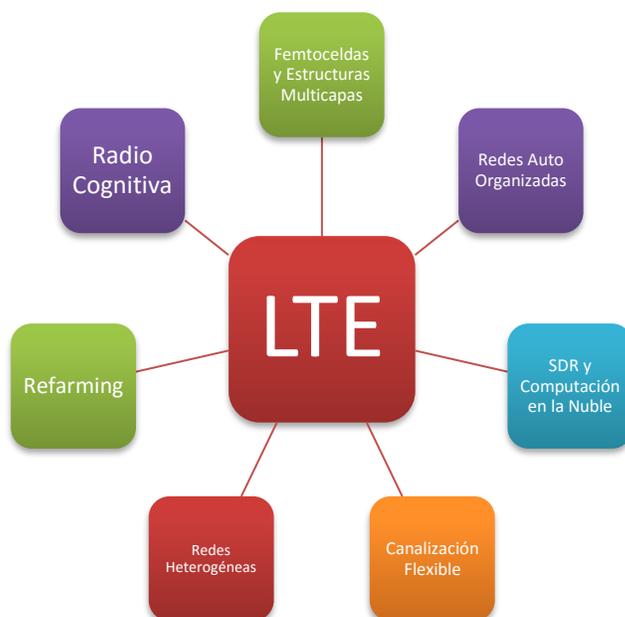


Figura 1.6 Componentes asociados al despliegue LTE. Elaboración propia.

Existen varios métodos y algoritmos aplicados al dimensionamiento del acceso de estas redes y que se encargan de manejar elementos comunes tales como: altura de las antenas y ángulo de inclinación, potencia de transmisión, capacidad y ancho de banda, ubicación de la estación base, distribución de los usuarios por unidad de área, entre otros [16]. Es posible además encontrar métodos de diseño con enfoques determinados donde los modelos analíticos contienen una carga importante de cálculo, por lo que las herramientas de software de planeamiento y simulación son comúnmente usadas. La precisión y el cálculo computacional son directamente proporcionales, debido fundamentalmente a la variación espacial de la carga de tráfico, las pérdidas de propagación y la interferencia. Es válido destacar que el problema del diseño de estas redes es en general combinatorio. La mayoría de los casos analizados resuelven elementos particulares dentro del dimensionamiento de redes de acceso LTE. El escenario mixto, o sea, donde existen múltiples tecnologías de acceso, es el más complejo, debido al conjunto de consideraciones que se manejan y la determinación y el cálculo de los modelos de propagación resulta un elemento importante en las predicciones de cobertura de las estaciones bases.

Por lo antes expuesto es necesario investigar las herramientas de software que permiten planear redes de acceso móviles, con la finalidad de hacer uso de ellas y contribuir al cumplimiento de los objetivos de este trabajo.

1.6 Conclusiones Parciales.

Una vez analizada la evolución de las comunicaciones móviles, considerando su estado actual y sus tendencias es posible expresar que la tecnología LTE, descrita mediante especificaciones del 3GPP, es considerada por los operadores y proveedores de servicios móviles como el acceso actual de mejores prestaciones y con mayor estabilidad, por lo que su crecimiento está garantizado lo que demuestra además la madurez de esta tecnología. Una de sus fortalezas es la interoperatividad con otras redes de acceso lo que sustenta con mayor fuerza la decisión de evolución hacia LTE por parte de los operadores y proveedores de servicios actuales.

En la literatura científica consultada es apreciable la diversidad de procedimientos para el diseño de redes de acceso, donde se destaca el uso de herramientas de software para darle solución a los problemas de cálculo generados por elementos a considerar como la distribución espacial de la carga de tráfico, las pérdidas de propagación y la interferencia. Es apreciable que el problema del dimensionamiento de estas redes de acceso es en general combinatorio y el escenario más complejo es el heterogéneo debido al conjunto de consideraciones que se manejan.

CAPITULO 2. DESPLIEGUE DE LA RED DE ACCESO LTE

2.1 Herramientas de Simulación de Redes de Acceso Móviles. Atoll.

Los software líderes en el diseño de redes de acceso móviles según [37] son ASSET que es un software de la compañía inglesa AIRCOM, Mentum Planet proveniente de la compañía inglesa InfoVista, y Atoll proveniente de la compañía francesa Forsk.

Mentum Planet

Esta herramienta se utiliza por la mayoría de los operadores móviles, integradores y proveedores de equipos para la planificación de radio frecuencia, logrando la optimización y gestión del rendimiento de la red. Soporta todos los estándares de acceso inalámbrico, y permite actuar sobre todas las etapas del ciclo de vida de la red. Ofrece una interfaz de usuario intuitiva con el respaldo de una documentación de usuario muy completa. Incorpora un sistema de información geográfica (GIS, *Geographic Information System*) profesional de MapInfo, y un conjunto de herramientas de GIS avanzadas que proporcionan una base para la gestión de todos los datos geográficos en el entorno de planificación de redes de radio [38].

Asset

Esta herramienta facilita el diseño de redes avanzadas minimizando tiempo y costo durante el despliegue de la red mediante la automatización de tareas como la configuración del sitio, la planificación del tráfico, el análisis de redes y la planificación de sus parámetros. Permite una integración entre sistemas tales como inventarios, gestión de configuración, gestión del rendimiento, y otros. Este intercambio de datos proporciona mejoras significativas en la exactitud de la planificación.

Atoll

Atoll es una herramienta de diseño y optimización de red multiplataforma de tecnología escalable y flexible. Cuenta con interfaces abiertas que permiten la integración de módulos complementarios personalizados. Está diseñado para funcionar en una amplia gama de escenarios de implementación, utilizando la computación distribuida y paralela. Incluye características avanzadas de tecnología múltiple de planificación de red. Soporta la planificación de redes 3GPP, no 3GPP y redes de enlace de microondas; también incluye un motor de cálculo de propagación de altas prestaciones. Contiene un conjunto de herramientas totalmente integradas como son: planificación automática de frecuencia y planificación automática de celdas, que permiten a los operadores realizar las tareas de diseño y optimización utilizando una sola base de datos. Es compatible con entornos multiusuarios a través de una arquitectura de base de datos que proporciona una gestión de derechos de usuarios, intercambio de datos, gestión de integridad de datos y una fácil integración con otros sistemas de tecnología de la información. Permite la automatización de tareas a través de un lenguaje de macros estándar, e incluye un kit de desarrollo de C++ que facilita la personalización y la integración de tecnologías de la información. Soporta datos geográficos de múltiples formatos y múltiples resoluciones. Cuenta con un editor de cartografía y se integra con herramientas líderes de GIS como MapInfo y ArcView [39].

Es posible decir que las tres herramientas satisfacen las necesidades requeridas. Por tanto, se decide utilizar la herramienta Atoll porque además de satisfacer las necesidades requeridas este software es usado por el Departamento de Servicios Móviles de Etecsa para el planeamiento y la optimización de sus redes de acceso y se disponen de licencias y mapas para la realización de proyectos.

Atoll es un software para planificación y optimización de radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificación de sus redes y estudiar el comportamiento de las mismas para optimizarlas de la mejor manera posible. Es a partir del año 2008 cuando Atoll empieza a incluir un módulo LTE que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN. Además, con las versiones recientes, Atoll ofrece la posibilidad de crear redes avanzadas de múltiples tecnologías, como por ejemplo GSM/UMTS/LTE, CDMA2000/LTE, haciéndolo un software ideal para aquellos operadores que necesitan migrar sus redes hacia LTE.

2.2 Atoll para el Dimensionamiento.

Para la realización de un proyecto de planeamiento usando más de una tecnología de acceso, Atoll ofrece ciertas herramientas que permiten verificar la red y basado en los resultados de las pruebas es posible modificar algunos parámetros definidos. Para el diseño de una red de acceso de múltiples tecnologías 3GPP es recomendable seguir los pasos mostrados en el Anexo XXI.

El primer paso para cualquier proyecto de planificación de radio es recopilar la información necesaria en cuanto a los equipos de radio (emplazamientos, transmisores, antenas), información de la tecnología de radio como: bandas de frecuencias y otros parámetros específicos de la tecnología a implementar e información geográfica que se utilizará en el despliegue. El segundo paso consiste en la creación de un nuevo proyecto o la apertura de uno existente, para esto Atoll tiene definido unas plantillas con parámetros específicos de cada tecnología y en este caso se selecciona la plantilla LTE/UMTS/GSM para modelar la red según las especificaciones del 3GPP. El tercer paso consiste en la configuración de la red agregando los mapas del terreno, sitios, transmisores, celdas y todos aquellos parámetros de la red que fueron recopilados en el primer paso.

Atoll ofrece la posibilidad de realizar predicciones básicas de cobertura por nivel de señal recibida sin tomar en cuenta las interferencias. Estas predicciones comprenden estudios del nivel de señal recibido de distintas señales en cada píxel del mapa, coberturas por transmisor y estudios de solapamiento que permiten estudiar la configuración inicial de la red sin tomar en cuenta datos de tráfico. La Tabla 2.1 muestra las distintas predicciones que pueden realizarse en Atoll y una breve descripción de cada una.

Tabla 2.1. Predicciones de cobertura disponibles en Atoll. Elaboración Propia.

Clasificación	Nombre	Descripción
Por nivel de señal	<i>Cobertura por Nivel de Señal</i>	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa.
	<i>Cobertura por Trasmisor</i>	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor.
	<i>Zonas de Solapamiento</i>	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.

	<i>Análisis de Señal Efectiva</i>	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH).
Por calidad de señal	<i>Cobertura por Nivel de $C/(I+N)$</i>	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido para cada píxel del mapa.
	<i>Análisis del Área de Servicio</i>	Permite calcular y mostrar los mejores portadores de radio disponibles para cada píxel del mapa basados en las SNR de los mismos.
	<i>Análisis del Área de Servicio Efectiva</i>	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible tanto en el enlace ascendente como descendente.
	<i>Cobertura por Throughput</i>	Permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa los <i>throughput</i> de los canales y la capacidad de la celda basados en los niveles de SNR y en los portadores de radio disponibles. Además, permite mostrar el <i>throughput</i> agregado de la celda para resultados de simulaciones.
	<i>Cobertura por Indicador de Calidad.</i>	Permite calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad como la razón de error de bloque (BLER, <i>Block Error Rate</i>) basados en los portadores de radio y en los niveles de SNR de cada píxel.

Posteriormente se realizar una asignación de los identificadores físicos de las celdas para facilitar el procedimiento de selección de celdas. Atoll permite que estos tres pasos puedan llevarse a cabo de forma manual o automática. Para realizar predicciones de cobertura avanzadas es necesaria la información de cargas de tráfico de las celdas que conforman la red, porque a medida que la carga de una celda se incrementa, se reduce el área de cobertura que ésta ofrece. Para ello pueden realizarse simulaciones Monte Carlo, basadas en los mapas de tráfico o en las listas de suscriptores, o se pueden definir los valores manualmente para cada celda. Las predicciones en este punto se calculan en base a la calidad de la señal recibida tomando en cuenta las interferencias y comprenden el estudio de nivel portadora a interferencia, área de servicio de las celdas, cobertura por *throughput* o indicadores de calidad. Por último, se analizan los resultados de las simulaciones y las predicciones de cobertura por calidad de señal para realizar modificaciones, si es necesario, en los parámetros configurados al inicio, o realizar cambios en la planificación frecuencial.

Para este proyecto se hace necesario la realización de un análisis estadístico que contiene datos tales como: conocimiento del modelo de propagación a emplear, densidad de usuarios en la zona de trabajo, perfiles de velocidad de datos, tipos de tráfico, requisitos de calidad, información de la tecnología de radio como las bandas de frecuencias, parámetros específicos de las tecnologías en cuestión, y la información geográfica, que puede ser clases de *clutter*, altura de *clutter*, mapas de tráfico y otros aspectos relacionados con el entorno. La definición de las diferentes tecnologías que componen el escenario heterogéneo provee a la interfaz de radio la inclusión de la tecnología LTE, modificando así el escenario actual, permitiendo el modelado de la red de acceso según las especificaciones del 3GPP.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al diseño de una red LTE con la herramienta Atoll.

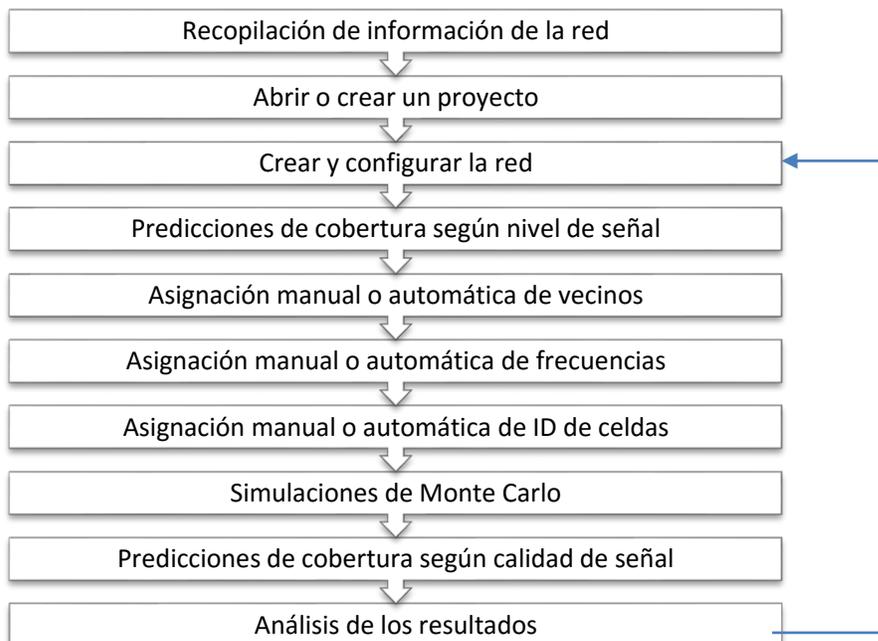


Figura 2.1. Flujo de trabajo. Elaboración propia

2.3 Simulaciones de Monte Carlo.

Las simulaciones de Atoll corresponden a una foto instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Los principales resultados de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. Los resultados de dichas simulaciones pueden ser observados en el mapa, así como en tablas que muestran las estadísticas de las simulaciones y los datos asociados a los sitios, celdas y terminales. El algoritmo que emplea Atoll para las simulaciones de las redes LTE consta de los pasos descritos a continuación.

Generación y distribución de los usuarios

Atoll genera una distribución de usuarios para cada simulación mediante el algoritmo Monte Carlo. Los usuarios son generados usando una distribución de Poisson basándose en los mapas de tráfico que contienen la información del tipo de entorno para cada píxel del mapa. Cada uno de los entornos tiene a su vez la información de los perfiles de usuario con sus movibilidades y densidades asociadas. En este sentido, cada móvil generado tiene asignado un servicio, una movilidad y un tipo de terminal de acuerdo al perfil de usuario que se le ha asignado previamente. También se determina para cada móvil el estado de transmisión de acuerdo a las probabilidades de actividad para cada servicio. Cabe destacar que el estado del móvil influye directamente en los siguientes pasos del proceso de las simulaciones tanto en los cálculos de la gestión de los recursos de radio como en los cálculos de interferencia. Posteriormente se calculan los valores de energía por elemento de recurso (EPRE, *Energy per Resource Element*) de los canales a partir de la potencia máxima de los transmisores, se inicializan los

valores de potencia de transmisión de los terminales a la máxima definida y los valores de carga de las celdas se inicializan según estén establecidos en la tabla de celdas.

Determinación de la mejor celda servidora

En este punto se determina la mejor celda servidora para cada móvil según los niveles de señal recibida en el enlace de bajada de las señales de referencia de los distintos transmisores, siendo seleccionada aquella con la mayor potencia de señal recibida.

Determinación del área de servicio

Para cada móvil se determina si se encuentra dentro del área de servicio de la celda seleccionada como su mejor servidor. Para esto se debe cumplir que el EPRE de la señal de referencia recibido por el móvil sea mayor o igual a la mínima señal de referencia recibida EPRE (RSRP, *Received Reference Signal Energy per Resource Element*) definido para la celda.

Cálculos en el enlace de bajada

Se calcula la relación potencia a interferencia más ruido de las señales de referencia, PBCH, PDSCH y PDCCH para cada móvil en el enlace de bajada, se determina el mejor portador disponible según la relación potencia a interferencia más ruido del canal PDSCH, se calcula el *throughput* de canal en la ubicación del móvil, se realiza la asignación de los recursos a los usuarios de cada celda de acuerdo a las prioridades de los servicios y a las demandas de *throughput*, y por último se calcula el *throughput* de cada usuario según los recursos que le fueron asignados.

Cálculos en el enlace de subida

De forma similar al enlace de bajada, en el enlace de subida se calcula la relación potencia a interferencia más ruido de los canales PUSCH y PUCCH, se determina el mejor portador disponible según la relación potencia a interferencia más ruido de los canales PUSCH y PUCCH, se realiza el control de potencia en el enlace de subida, se calcula el *throughput* del canal, se lleva a cabo la asignación de los recursos y se calcula el *throughput* de cada usuario.

Resultados

Una vez que se han asignado los recursos a todos los móviles se actualizan los valores de carga de tráfico e incremento de ruido en el enlace de subida de acuerdo a la cantidad total de recursos en uso en cada celda. De acuerdo a los valores de incremento de ruido en el enlace de subida de cada celda se realiza el control de potencia de transmisión de los móviles de las celdas vecinas para ser tomados en cuenta en las siguientes iteraciones. Cuando los resultados superan las pruebas de convergencia, finaliza la simulación y se muestran los resultados.

2.4 Análisis estadístico.

Para conocer el número de simulaciones que garantizan la confiabilidad de los resultados es posible apoyarse en la expresión (2.1).

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2} \quad (2.1)$$

Donde:

n : Número de simulaciones.

Z : Nivel de confianza que se decide.

$p * q$: Varianza de la proporción.

e : Error máximo permitido.

Cuando el nivel de confianza es del 99%, $Z = 2.58$, además se estima que el error máximo que se permite es de un 3%, y el valor de p igual a 0.5 y q igual a 0.5, entonces sustituyendo en (2.1):

$$\begin{aligned} n &= \frac{2.58^2 * 0.5 * 0.5}{0.03^2} \\ n &= \frac{1.664}{0.0009} \quad (2.2) \\ n &= 1848.9 \end{aligned}$$

Por tanto, el número de simulaciones requeridas es 1850. Es posible encontrar en internet calculadoras que resuelven este tipo de ecuaciones [40].

Otro parámetro que garantiza la confiabilidad de las simulaciones es el intervalo de confianza [41]. Se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$CI = \pm Z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

Donde:

CI : Intervalo de confianza.

σ : Desviación estándar.

n : Número de simulaciones.

Z : Valor crítico que depende del nivel de confianza.

Por ejemplo, para el caso de la simulación de la interfaz de radio GSM conociendo que la desviación estándar no es mayor que 16 unidades ($\sigma < 16$), para una probabilidad de ocurrencia de las mediciones de un 99%, siendo $Z = 2.58$, y habiendo realizado 1850 simulaciones, el intervalo de confianza donde se encuentran las mediciones es de ± 0.96 unidades garantizándose así la exactitud de los resultados.

2.5 Planificación de la Red de Acceso LTE.

El objetivo de la planificación de la red de radio es seleccionar las ubicaciones de los sitios y las configuraciones para crear una nueva red o evolucionar la red existente. Pudieran definirse tres tipos fundamentales de planificación, uno en el que se desarrolla la red desde cero, otro en el que se superponen las tecnologías y se combinan los sitios y otro en el que se expande la red para mejorar la cobertura o la capacidad, siempre considerando una implementación eficiente de la red minimizando los costos. Las limitaciones están dadas fundamentalmente por la utilización de un modelo de propagación para evidenciar la forma en que características como las frecuencias de radio se ven

afectadas. El tráfico esperado en términos del número de usuarios y el volumen son predecibles de manera aproximada teniendo en cuenta la red existente y su comportamiento. El proceso de planificación puede ser caracterizado por entradas como la fase de la red de radio y salidas como los resultados de la planificación.

Para este caso las entradas que deben ser tenidas en cuenta son: la tecnología LTE, esencialmente la interfaz de radio, el área de cobertura, las frecuencias que se utilizan, los perfiles de tráfico de los usuarios y los servicios ofrecidos, así como parámetros del entorno como la topología, morfología, información de tráfico, coordenadas de los sitios y características de las antenas. Las salidas son el dimensionamiento celular donde se conciben la cantidad de sitios necesarios, la planificación de la red de radio donde se obtienen los detalles de los enlaces resultantes de las ubicaciones geográficas de los sitios, y la optimización que constituye un proceso cíclico que implica el dimensionamiento y la planificación para corregir los parámetros establecidos en caso necesario.

Para el adecuado planeamiento es necesario realizar un análisis de cobertura y de capacidad. Para ello se deben detallar los requerimientos técnicos para el diseño, definir el área de cobertura de la red, calcular el número de estaciones E-UTRAN y analizar el tráfico, analizar las pérdidas utilizando el modelo Hata-Cost 231, calcular el radio de la estación base y el área de cobertura, y asignar las frecuencias de operación. Sin embargo, dentro del diseño se toman en cuenta factores como la limitación de frecuencias, la movilidad de los usuarios, la distribución de tráfico, la introducción de nuevos servicios, la interoperatividad con otras redes de acceso, entre otros. A todo esto, se suma un factor de suma importancia y es el económico.

2.5.1 Descripción del Escenario.

El escenario está concebido dentro de un área de 25.75 Km², y comprende la ciudad de Santa Clara. En el área de interés se resuelve un tráfico GSM de 452.8377 Erlang, de acuerdo a la Tabla 2.2. Conociendo que el tráfico de voz medio por usuario en Cuba es de aproximadamente 12 mErl, es posible decir que existen en esa área 37667 usuarios móviles.

Tabla 2.2. Tráfico GSM del escenario de trabajo en la hora cargada. Elaboración propia.

	Site	Sector	Sector	Sector	Tráfico (Erl.)
1	12 Plantas	21.5256	19.1678	17.2744	57.9678
2	AIT	23.4753	23.4089	12.9353	59.8195
3	Camacho CT	19.6856	14.0725	8.6517	42.4098
4	Condado Norte	20.4231	11.9222	7.4764	39.8217
5	Gerencia VCL	17.8506	7.0911	6.7728	31.7145
6	Santa Clara CT	41.5519	37.3658	36.5742	115.4919
7	URA La Salud	45.3019	35.8828	24.4278	105.6125
				Total	452.8377

Esto hace que existan como promedio una densidad de usuarios móviles por unidad de área de 1463 usuarios/Km².

El área contiene 7 sitios que proveen acceso GERAN y 7 sitios que proveen acceso UTRAN. Como parte de los procesos de evolución y desarrollo, la condición de aprovechar la infraestructura y medios existentes es esencial, y es por ello que en cada sitio existen ambas tecnologías. A esto se suma la

escalabilidad del equipamiento dispuesto por los fabricantes que permiten evoluciones graduales sin cambios significativos.

Los servicios que hoy se ofrecen son muy limitados y están soportados fundamentalmente en el acceso GERAN, dígame llamada de voz, sms, mms, y transmisión de datos a baja velocidad.

El tiempo medio de llamada es de 59 segundos. El tráfico por usuario es de 12 mErl. La cantidad de llamadas por hora por el tiempo medio de llamada da como resultado el tráfico por usuario y el tráfico por usuario por la cantidad de usuarios constituye el tráfico de la red. Para el acondicionamiento de los parámetros de tráfico se considera un perfil de usuario cuya duración media de llamada es de 59 segundos y cantidad de llamadas por hora de 0.73.

Siendo consecuente con los criterios anteriores se considera la creación de la red LTE partiendo de los sitios existentes, por tanto, se localizan 7 sitios LTE en el lugar donde se encontraban los sitios anteriores. De esta manera se concibe una red de múltiples tecnologías de acceso 3GPP con la inclusión del acceso E-UTRAN.

Para el cálculo del área de cobertura se utiliza un valor del radio de la celda de 1 Km según la recomendación M.1035 de la UIT [13], y la expresión (2.4), donde resulta que el área de cobertura de cada estación base es $A = 2.6 \text{ Km}^2$

$$A = \frac{3\sqrt{3}(R)^2}{2} \quad (2.4)$$

Tabla 2.3. Características del escenario de estudio para LTE. Elaboración propia.

Población del sector urbano (según ONEI [42])	214370
Población con servicio GSM en el escenario (Tabla 2.2)	37667
Posibles usuarios LTE (40%)	15067
Extensión del área	25.75 Km ²
Radio de cobertura de la celda	1 Km
Área de cobertura de la estación base	2.6 Km ²
Número de usuarios que soporta la estación base	2000
Cantidad de estaciones bases por cobertura	10

2.5.2 Modelo de Propagación.

Para cobertura celular las condiciones de propagación no son de visión directa, existen obstrucciones entre el transmisor y el receptor que generan reflexiones y difracciones reduciendo la intensidad de la señal. Las señales que alcanzan el receptor son componentes del camino directo y poseen retardos, atenuaciones y polarizaciones relativas. Las pérdidas de propagación tienen un carácter aleatorio por lo que puede hablarse de cobertura desde el punto de vista estadístico. Para este caso se analizan tres tipos de propagación que resultan de gran ayuda para determinar el comportamiento de la red. El modelo de propagación de espacio libre se analiza en un entorno ideal, es decir un estudio en el espacio libre considerando únicamente antenas isotrópicas, en el modelo de Okumura-Hata se añaden ciertos parámetros que intervienen considerando un entorno más real para luego adecuar el modelo a

frecuencias mayores y con ello hacer uso del Hata-Cost 231, y finalmente se estudia el modelo Cost-231.

Modelo de propagación en el espacio libre

Como primer punto es recomendable calcular la atenuación en el espacio libre, considerando antenas isotrópicas, con el fin de obtener una característica independiente de las antenas utilizadas. La mayor parte de la potencia de la señal se perderá en el aire, aún en el vacío una onda de radio pierde energía que se irradia en direcciones diferentes a la antena receptora. Cabe mencionar que esto no tiene nada que ver con el aire, la niebla, la lluvia o cualquier otra cosa que puede adicionar pérdidas, la pérdida en el espacio libre mide la potencia que se pierde en el mismo sin ninguna clase de obstáculo. La señal de radio se debilita en el aire debido a la expansión dentro de una superficie esférica, además la pérdida en el espacio libre es proporcional al cuadrado de la distancia y también proporcional al cuadrado de la frecuencia.

La ecuación (2.5) permite calcular las pérdidas en el espacio libre de acuerdo a la recomendación P.525-2 de la UIT [43].

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (2.5)$$

Siendo:

L_{bf} : pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre (dB)

d : distancia (Km)

f : frecuencia (MHz)

Sustituyendo la frecuencia a utilizar se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Pérdidas en el espacio libre. Elaboración propia.

Frecuencia	Distancia	Pérdida
1800 MHz	1 Km	97.51 dB

Modelo de propagación de Okumura-Hata

Okumura-Hata obtuvo varios resultados siendo el principal un conjunto de curvas que proporcionan: el nivel de atenuación media relativa respecto al espacio libre en función de la frecuencia, la distancia entre el transmisor y receptor, y las alturas de las antenas para la estación base. Obtuvo también algunos factores de corrección específicos para analizar diferentes tipos de trayectos. El modelo de Okumura-Hata, cuya ecuación es la (2.6), está considerado entre los más simples y mejores en términos de su precisión en el cálculo de pérdidas de propagación. La UIT en su recomendación M.1641-1 propone utilizar una altura de antena de recepción igual a 1.5 m, valor típico en aplicaciones móviles [44].

$$L_b = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10} d \quad (2.6)$$

Donde:

L_b : Pérdidas de propagación.

f : Frecuencia de la portadora en MHz.

h_b : Altura de la antena transmisora en metros, válido para $30 \text{ m} < h_b < 200 \text{ m}$

h_m : Altura de la antena receptora en metros, válido para $1 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m}$

$a(h_m)$: Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil. Este factor de corrección que depende de la altura del terminal móvil se determina para ciudades pequeñas en áreas urbanas tomando en cuenta los siguientes parámetros:

$$a(h_m) = (1.11 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (2.7)$$

$$1 \leq h_m \leq 10 \text{ m}$$

Para ciudades grandes se tienen dos expresiones que dependen del valor de la frecuencia:

$$a(h_m) = 8.29(h_m \log_{10} 1.54)^2 - 1.1 \text{ para } f \leq 200 \text{ MHz} \quad (2.8)$$

$$a(h_m) = 3.2(h_m \log_{10} 11.75)^2 - 4.97 \text{ para } f \geq 400 \text{ MHz} \quad (2.9)$$

d : Distancia entre la estación base y el móvil expresada en Km ($1 \text{ Km} < d < 20 \text{ Km}$)

El modelo de Okumura-Hata establece rangos para sus diferentes variables, las que se citan a continuación:

$$150 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} < h_r < 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m}$$

$$1 \text{ Km} < d < 20 \text{ Km}$$

La ecuación (2.6) de Okumura-Hata proporciona buenos resultados en entornos urbanos y suburbanos, pero no así en áreas rurales, ya que no toma en cuenta la ondulación del terreno ni los efectos derivados del grado de urbanización a lo largo del trayecto, además está limitada a frecuencias inferiores a 1500 MHz.

Modelo de propagación Hata-Cost 231

Para trabajar con frecuencias mayores existe una variante a la fórmula denominada Hata-Cost 231, ecuación (2.10), que proporciona valores de pérdidas para frecuencias hasta 2000 MHz, como se muestra a continuación:

$$L_b = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_t) \log_{10} d + C_m \quad (2.10)$$

Para zonas urbanas:

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10}(11.75H_r))^2 - 4.97 \quad (2.11)$$

Para zonas suburbanas:

$$a(h_r) = (1.11 \log_{10}(f) - 0.7)H_r - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (2.12)$$

Siendo:

f : Frecuencia en MHz.

h_t : Altura de la antena transmisora. (30 m)

$a(h_r)$: Parámetro de corrección para entornos urbanos y suburbanos.

d : Distancia del enlace en Km.

H_r : Altura de la antena del equipo local del cliente (CPE, *Customer Premises Equipment*) en metros.

C_m : una constante con valores: $C_m = 0$ dB, para ciudades de tipo medio y áreas con una densidad de árboles moderada - suburbano. $C_m = 3$ dB, para grandes centros metropolitanos - urbano.

Sustituyendo en (2.10)

$$L_b = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_t) \log_{10} d + C_m$$

$$L_b = 46.3 + 110.354 - 6.594 + 3 \quad (2.13)$$

$$L_b = 153.06 \text{ dB}$$

En la Tabla 2.5 se muestra la pérdida que resulta de la aplicación del modelo Hata-Cost 231.

Tabla 2.5. Resultados del modelo Hata-Cost 231. Elaboración propia.

Frecuencia	Distancia	Pérdida
1800 MHz	1 Km	139.24 dB

Modelo de propagación Cost 231

Este modelo es la combinación de Walfisch-Bertoni e Ikegami, con correcciones empíricas de algunos parámetros, y restringido a terrenos urbanos planos [45]. La descripción de su fórmula es:

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{mds} \quad (2.14)$$

L_{bf} : Pérdidas en el espacio libre. Ecuación (2.5).

L_{rts} : Pérdida debida a la difracción entre edificios y el móvil:

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (2.15)$$

$$\Delta h_m = h_r - h_m$$

h_r : altura de los edificios definido como 3m por el número de pisos.

h_m : altura de la estación móvil (equipo de usuario) 1,5 m como valor medio según UIT.

Si $L_{rts} \leq 0$, se toma $L_{rts} = 0$.

$$L_{ori} = \{-10 + 0.345\varphi \text{ para } 0^\circ < \varphi < 35^\circ\}$$

$$L_{ori} = \{2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ) \text{ para } 35^\circ < \varphi < 55^\circ\} \quad (2.16)$$

$$L_{ori} = \{4 - 0.114(\varphi - 55^\circ) \text{ para } 55^\circ < \varphi < 90^\circ\}$$

L_{mds} : Permite evaluar la difracción multiobstáculo entre el móvil y la estación base.

$$L_{mds} = L_{bsh} + K_a + K_d \log_{10}(d) + K_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (2.17)$$

Este término tiene una variación con la altura de la estación base:

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) \quad (2.18)$$

Si $\Delta h_b < 0$ entonces $L_{bsh} = 0$.

$$K_a = \{54 \text{ para } h_b > h_r\}$$

$$K_a = \{54 - 0.8\Delta h_b \text{ para } d \geq 0.5 \text{ Km y } h_b \leq h_r\} \quad (2.19)$$

$$K_a = \left\{ 54 - 0.8\Delta h_b \frac{d}{0.5} \text{ para } d < 0.5 \text{ Km y } h_b \leq h_r \right\}$$

$$K_d = \{18 \text{ para } h_b > h_r\}$$

$$K_d = \left\{ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} \text{ para } h_b \leq h_r \right\} \quad (2.20)$$

$$K_f = \left\{ -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \text{ suburbano} \right\} \quad (2.21)$$

$$K_f = \left\{ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \text{ urbano} \right\}$$

Para aplicar estas ecuaciones se tienen en cuenta los siguientes parámetros tomando como referencia la Recomendación P.1411 de la UIT [46].

Tabla 2.6. Parámetros aplicados en el modelo Cost 231. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Restricciones del modelo	Detalle
h_r	12 m		Altura del edificio
h_m	1.5 m	$1 \text{ m} < h_m < 3 \text{ m}$	Altura de la estación móvil
h_b	30 m	$4 \text{ m} < h_b < 50 \text{ m}$	Altura de las antenas de la estación base
d	1 Km	$0.02 \text{ Km} < d < 50 \text{ Km}$	
b	15 m		Separación media entre edificios
f	1800 MHz	$800 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$	Frecuencia de la portadora
w	$b/2$		Ancho de la calle
K_a	54		Representa el incremento de la pérdida en el trayecto por debajo de la altura media de los edificios
K_d	18		Dependencia de L_{mds} respecto a la distancia
K_f	-2.581		Dependencia de L_{mds} respecto a la frecuencia

L_{bsh}	-18.74 dB		Término que depende de la altura de la estación base
L_{mds}	10.87 dB		Evalúa la difracción multiobstáculo
L_{ori}	3.25 dB		Factor de corrección que cuantifica las pérdidas debido a la orientación de la calle
L_{rts}	40.15 dB		Principios de difracción. Tiene en cuenta el ancho de la calle y su relación con la dirección de propagación
φ	45°		Ángulo formado por la dirección de propagación y el eje de la calle
Δh_m	$h_r - h_m$		Altura relativa del edificio respecto al móvil
Δh_b	$h_b - h_r$	$\Delta h_b > 0$	Altura relativa de la antena de la estación base respecto al edificio

Sustituyendo:

$$L_{bf} = 97.51 \text{ dB según (2.5)}$$

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_m) + L_{ori} \text{ según (2.15)}$$

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log_{10}(7.5) + 10 \log_{10}(1800) + 20 \log_{10}(10.5) + 3.25$$

$$L_{rts} = -8.2 - 10 * 0.875 + 10 * 3.255 + 20 * 1.021 + 3.25$$

$$L_{rts} = -8.2 - 8.75 + 32.55 + 20.42 + 3.25$$

$$L_{rts} = 40.15 \text{ dB}$$

$$L_{mds} = L_{bsh} + K_a + K_d \log_{10}(d) + K_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \text{ según (2.17)}$$

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) \text{ según (2.18)}$$

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + (30 - 12))$$

$$L_{bsh} = -18 * 1.279$$

$$L_{bsh} = -23.02 \text{ dB}$$

$$L_{mds} = -23.02 + 54 + 18 * \log_{10}(1) - 2.581 * \log_{10}(1800) - 9 \log_{10}(20)$$

$$L_{mds} = 30.98 - 8.402 - 11.709$$

$$L_{mds} = 10.87 \text{ dB}$$

$$L_b = 148.78 \text{ dB}$$

A partir de la ecuación (2.14) se obtiene el valor de pérdida mostrado en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Pérdidas modelo COST-231. Elaboración propia.

Frecuencia (MHz)	Pérdida (dB)
------------------	--------------

1800

148.78

Analizando los modelos estudiados anteriormente es posible concluir que la precisión del modelo y las pérdidas de la señal son directamente proporcionales. La precisión del modelo implica tener en cuenta la mayor cantidad de variables que inciden sobre la energía de la señal que se propaga entre el transmisor y el receptor, por tanto, el modelo más realista será el que refleje mayores pérdidas. En la Figura 2.2 se muestra una comparación de los modelos previamente estudiados.

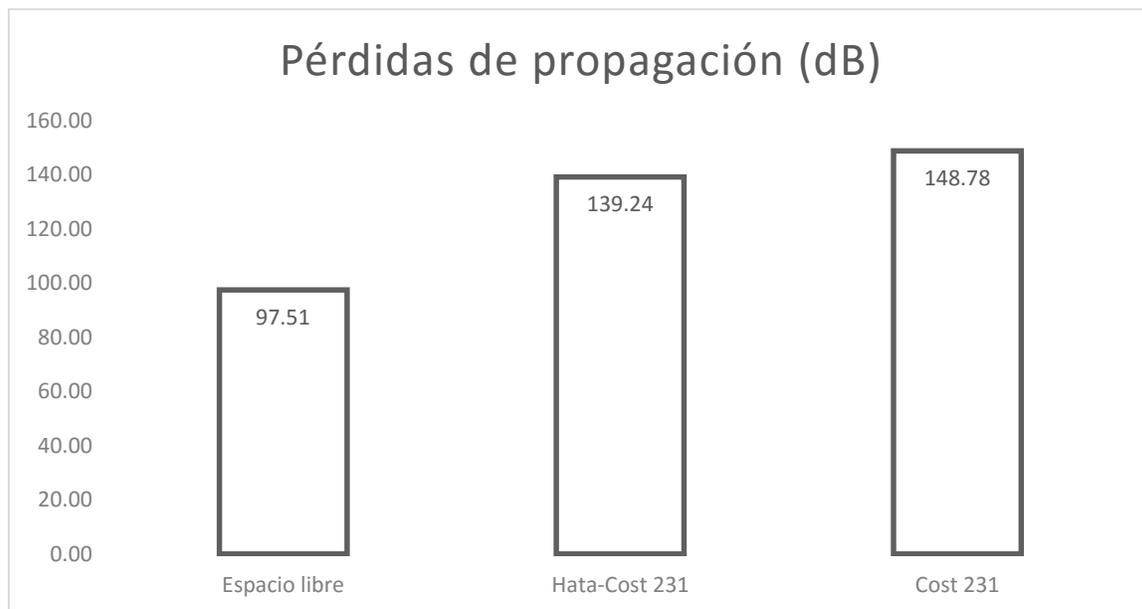


Figura 2.2. Comparación de las pérdidas de los modelos de propagación. Elaboración propia.

En este trabajo se decide utilizar el modelo Hata-Cost 231 porque es el que más se ajusta al escenario de estudio y aunque las mayores pérdidas se reflejen en la aplicación del modelo Cost 231, este está restringido a entornos planos, lo que difiere del caso que se estudia y, por tanto, no se decide su aplicación.

2.5.3 Banda de Frecuencia.

Las bandas de operación de LTE se definen en la especificación 36.101 del 3GPP [47]. Para este proyecto se tiene en cuenta la banda 3. Esta banda es la asignada a Etecsa para la realización de las pruebas de campo LTE. Las características de la banda 3 son:

Tabla 2.8. Banda 3 LTE y ancho de banda. Elaboración propia.

Banda E-UTRA	3
Modo de duplexado	FDD
Frecuencia	1800 MHz
Nombre común	DCS
Separación Tx-Rx	95 MHz
Enlace ascendente	1710-1785

Enlace descendente	1805-1880
Espaciado dúplex (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
Ancho de la banda	75 MHz
Espacio entre portadoras	100 KHz

Las frecuencias de las portadoras tanto del enlace de bajada como del enlace de subida se encuentran en el rango de 0 a 65535 el cuál es designado por medio del número de canal absoluto de radiofrecuencia E-UTRAN (EARFCN, *E-UTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number*), lo que permite asignar un determinado número para cada canal en una banda determinada. Los detalles para la banda 3 se muestran en la Tabla 2.9 [47].

Tabla 2.9. Número de canales E-UTRA. Tomado de [47].

Banda	Enlace de bajada		Enlace de subida	
	Frecuencia más baja	Rango del número	Frecuencia más baja	Rango del número
3	1805 MHz	1200-1949	1710	19200-19949

2.5.4 Balance del Enlace.

Para la realización de un análisis teórico del enlace en términos de energía se tienen en cuenta varios factores de pérdidas y de ganancias como son la potencia de transmisión, las ganancias de las antenas, las pérdidas del sistema, otras ganancias y los márgenes de desvanecimientos. Los cálculos realizados tienen como objetivo alcanzar el valor de potencia recibida (P_{RX}).

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{Prop} + G_{RX} \quad (2.22)$$

Donde:

P_{TX} es la potencia de transmisión (dBm).

G_{TX} es la ganancia de la antena de transmisión (dBi).

L_{Prop} son las pérdidas debidas a la propagación (dBm).

G_{RX} es la ganancia de la antena receptora (dBi).

Intervienen cuatro factores de los cuales tres de ellos son constantes y solamente uno, las pérdidas por propagación dependen de otros factores. Estas pérdidas son generadas tanto por los elementos que recorre la señal desde que se transmite hasta que llega a la antena, así como por la distancia una vez que la antena ha transmitido dicha señal. El primer tramo que recorre la señal es a través de una línea de transmisión y en este caso las pérdidas vienen dadas por el fabricante en dB/m. Sin embargo, los mayores valores de pérdidas se producen en la propagación por aire. Calcular estas pérdidas implica realizar un estudio de todos los elementos existentes entre el transmisor y el receptor para calcular todos los caminos que la señal puede tomar, dígame reflexiones, refracciones y difracciones, atenuación y fase que lleva cada camino, entre otros parámetros. Para evitar este proceso tan complejo se toma como referencia el modelo de propagación Hata-Cost 231 que se ajusta al escenario de trabajo.

Una vez obtenido el valor de P_{RX} , el siguiente paso a seguir es compararlo con el umbral de sensibilidad, para así garantizar el establecimiento del enlace.

$$P_{RX} \geq SENS_{RX} \quad (2.23)$$

En caso de cumplirse la inecuación (2.23) es posible asegurar que se cumplen las necesidades del sistema, esto es para el enlace de bajada y subida. Sin embargo, a lo largo del estudio no se hace referencia sobre uno u otro ya que para el cálculo de la potencia recibida se puede considerar que intervienen los mismos elementos, siendo la única diferencia el nivel de potencia de transmisión ya que el teléfono móvil, por sus normas de funcionamiento, no puede transmitir a más de 2W.

En la Tabla 2.10 se muestran los valores de sensibilidad de acuerdo con la especificación TS 36.101 del 3GPP para la modulación QPSK [48].

Tabla 2.10 Sensibilidad de referencia para QPSK. Tomado de [48].

Banda E-UTRA	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Modo de duplexado
3	-102.2	-99.2	-97	-94	-92.2	-91	FDD

2.5.5 Ancho de Banda.

En LTE la estructura más pequeña de modulación a utilizar es el elemento de recurso (RE, *Resource Element*). Un RE es una subportadora de 15 KHz por cada símbolo. Los RE conforman un bloque de recursos (RB, *Resource Block*). Un RB está estructurado en el dominio de la frecuencia por 12 subportadoras y en el dominio del tiempo con 6 o 7 símbolos. En la Banda 3 de LTE están habilitados los canales de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. De acuerdo a estos anchos de banda de canal en la Tabla 2.11 se muestran los parámetros siguientes:

Tabla 2.11. Configuración de transmisión. Elaboración propia.

Ancho de banda (MHz)	Número máximo de RB	Máximo ancho de banda utilizable (MHz)
1.4	6	1.08
3	15	2.7
5	25	4.5
10	50	9
15	75	13.5
20	100	18

2.5.6 Área de Cobertura.

Para determinar la cobertura del eNB se analiza el presupuesto del enlace en el enlace de subida. Se estima como margen de desvanecimiento un valor de 10 dB y para el cálculo se utiliza la expresión siguiente:

$$S_{rx}(dBm) = kTB + NF + SNR + IM - 3 \quad (2.24)$$

Donde:

$$kTB: -174(\text{dBm/Hz}) + 10 \log B = -104.458 \text{ dBm}$$

NF : Figura de ruido = 5 dB

SNR : Relación señal a ruido

IM : Margen de implementación

La relación señal a ruido es obtenida de la ecuación del límite de Shannon y depende del tipo de modulación y de la razón de código que se emplee, como se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Tipos de modulación en LTE. Elaboración propia.

CQI	Modulación	M	Razón de Código	Eficiencia espectral	SNR(dB)	IM(dB)
0	QPSK	4	0,00000	0,0000	0,0	0,0
1	QPSK	4	0,07617	0,1523	-9,5	2,5
2	QPSK	4	0,11719	0,2344	-7,5	2,5
3	QPSK	4	0,18848	0,3770	-5,2	2,5
4	QPSK	4	0,30078	0,6016	-2,9	2,5
5	QPSK	4	0,43848	0,8770	-0,8	2,5
6	QPSK	4	0,58789	1,1758	1,0	2,5
7	16QAM	16	0,36914	1,4766	2,5	3,0
8	16QAM	16	0,47852	1,9141	4,4	3,0
9	16QAM	16	0,60156	2,4063	6,3	3,0
10	64QAM	64	0,45508	2,7305	7,5	4,0
11	64QAM	64	0,55371	3,3223	9,5	4,0
12	64QAM	64	0,65039	3,9023	11,4	4,0
13	64QAM	64	0,75391	4,5234	13,4	4,0
14	64QAM	64	0,85254	5,1152	15,3	4,0
15	64QAM	64	0,92578	5,5547	16,6	4,0

Con estos datos es suficiente para calcular la sensibilidad de acuerdo al tipo de modulación aplicando la ecuación (2.24). Los valores de sensibilidad se muestran en la Tabla 2.13. LTE hace uso de modulación adaptativa QPSK, 16 QAM y 64 QAM.

Luego es posible calcular las pérdidas en el espacio a partir de la ecuación siguiente:

$$L = P_{tx} - S_{rx} - P_{cc} + G_{tx} - M_{sha} - P_{interf} - P_{int} \quad (2.25)$$

Donde:

L : Pérdidas en el espacio

P_{tx} : Potencia de transmisión (43 dBm)

S_{rx} : Sensibilidad en el receptor

P_{cc} : Pérdidas por cable y conectores (1 dBm)

G_{tx} : Ganancia de la antena transmisora (17 dBm)

M_{sha} : Margen de sombra (10.24 dB)

P_{interf} : Pérdidas por interferencias (2 dB)

P_{int} : Pérdida de interiores (17 dB)

Sustituyendo en (2.25).

$$L = 43 - S_{rx} - 1 + 17 - 10.24 - 2 - 17 \quad (2.26)$$

$$L = 29.76 - S_{rx}$$

Conociendo la sensibilidad es posible calcular las pérdidas para los diferentes tipos de modulación a emplear.

2.5.7 Radio de la Celda.

La ecuación (2.10) referida al modelo de propagación utilizado, permite determinar la cobertura de una celda. Para ello se calcula el radio de la celda en función de las pérdidas su despeje se muestra en la siguiente ecuación:

$$10^{\left(\frac{L-139.24}{35.22}\right)} = d \quad (2.27)$$

El radio de cobertura está relacionado con las pérdidas y por tanto los valores que toma el radio de cobertura varían en función del tipo de modulación que se emplee como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.13. Radio de la celda de acuerdo al tipo de modulación. Elaboración propia.

CQI	Modulación	M	Razón de Código	Eficiencia espectral	Shannon	IM	Sensibilidad	Pérdidas	Radio de la celda (Km)
0	QPSK	4	0,00000	0,0000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000
1	QPSK	4	0,07617	0,1523	-9,5	2,5	-109,5	139,3	1,001
2	QPSK	4	0,11719	0,2344	-7,5	2,5	-107,5	137,3	0,878
3	QPSK	4	0,18848	0,3770	-5,2	2,5	-105,2	135,0	0,756
4	QPSK	4	0,30078	0,6016	-2,9	2,5	-102,8	132,6	0,647
5	QPSK	4	0,43848	0,8770	-0,8	2,5	-100,7	130,5	0,564
6	QPSK	4	0,58789	1,1758	1,0	2,5	-99,0	128,7	0,503
7	16QAM	16	0,36914	1,4766	2,5	3,0	-96,9	126,7	0,441
8	16QAM	16	0,47852	1,9141	4,4	3,0	-95,0	124,8	0,389
9	16QAM	16	0,60156	2,4063	6,3	3,0	-93,1	122,9	0,343
10	64QAM	64	0,45508	2,7305	7,5	4,0	-90,9	120,7	0,298
11	64QAM	64	0,55371	3,3223	9,5	4,0	-88,9	118,7	0,261
12	64QAM	64	0,65039	3,9023	11,4	4,0	-87,0	116,8	0,230
13	64QAM	64	0,75391	4,5234	13,4	4,0	-85,0	114,8	0,202
14	64QAM	64	0,85254	5,1152	15,3	4,0	-83,2	112,9	0,179
15	64QAM	64	0,92578	5,5547	16,6	4,0	-81,8	111,6	0,164

Con los valores obtenidos para el radio de la celda en función del tipo de modulación es posible calcular el área de cobertura para los diferentes tipos de modulación. Sustituyendo en la ecuación (2.4) se obtiene aproximadamente que:

$$A = 2.598R^2 \quad (2.28)$$

Y como resultado:

Tabla 2.14. Área de cobertura por tipo de modulación empleado.

Modulación	Radio de la celda (Km)	Área (Km ²)	Área de cobertura (Km ²)	%
QPSK	1.001	2.601	2.097	80.60
16 QAM	0.441	0.505	0.274	10.54
64 QAM	0.298	0.230	0.230	8.85

Con lo que se demuestra que el área de cobertura varía de acuerdo al tipo de modulación que se emplee.

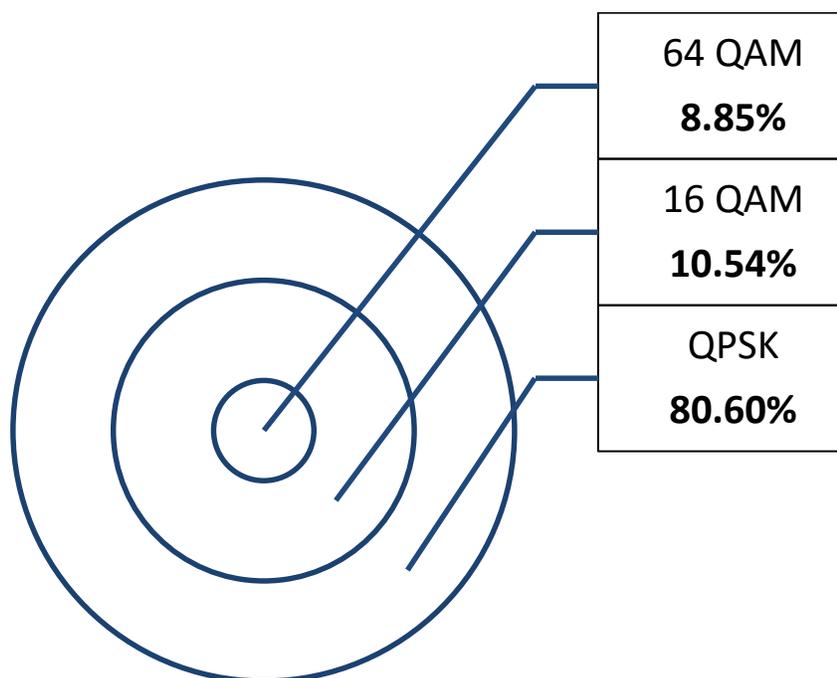


Figura 2.3. Área de cobertura y tipo de modulación. Elaboración propia.

El porcentaje de recursos de la matriz tiempo-frecuencia lleva tantos bits por símbolos como los de la modulación a la cual fue asignado. En la Tabla 2.15 se describe la distribución de los bloques de recursos en correspondencia con la modulación utilizada en el área de cobertura.

Tabla 2.15. Cantidad de RB por tipo de modulación. Elaboración propia.

Modulación	Área de cobertura (Km ²)	%	# de RB
QPSK	2.097	80.60	40

16 QAM	0.274	10.54	5
64 QAM	0.230	8.85	4

2.5.8 Capacidad de la Celda

Para calcular la capacidad de una celda es posible hacer uso de la expresión (2.29) [49].

$$N_{bits}^{SF} = N_{RB} * 12 * 2 * N_{symp}^{TS} * \log_2 M \text{ (bits)} \quad (2.29)$$

Donde:

N_{bits}^{SF} : Número de bits de una subtrama

N_{RB} : Número de bloques de recursos

N_{symp}^{TS} : Número de símbolos en una ranura de tiempo

$\log_2 M$: Cantidad de bits por símbolo

Como la subtrama dura 1ms la tasa binaria coincide con el número de bits de acuerdo a la ecuación (2.30).

$$R_{SF} = N_{bits}^{SF} \text{ (Kbps)} \quad (2.30)$$

Por ejemplo, para un ancho de banda de 10 MHz ($N_{RB} = 50$), prefijo cíclico normal ($N_{symp}^{TS} = 7$), y modulación 16 QAM ($\log_2 M = 4$), sustituyendo en (2.29) y (2.30), $R_{SF} = 33.6$ Mbps. Por tanto, el número de bloques de recursos asignados, el número de símbolos y el tipo de modulación determinarán la capacidad.

2.5.9 Cantidad de Usuarios

Para calcular la cantidad de usuarios que soporta una celda se tienen en cuenta los siguientes valores:

Tabla 2.16. Cálculo de usuarios por sitio. Elaboración propia.

a	Bits por símbolos	2,4,6	De acuerdo a la modulación	2 (QPSK)
b	Cantidad de bloques de recursos	De 1 hasta 100	Depende del ancho de banda	41
c	Capacidad de la celda	$c = a * b * 12 * 2 * 7 * 10^3$		13.8 Mbps
d	Relación pico promedio	0.85		0,85
e	Promedio del enlace de bajada en B del throughput por usuario		Función del tipo de servicio	12.2 Kbps
f	Número de celdas por sitio	3		3
g	Suscriptores que soporta el sitio	$g = (c * f) / ((1 + d)e)$		1831

En la tabla anterior se muestra un ejemplo en el que se estima la cantidad de suscriptores que alcanzan modulaciones QPSK, con 41 bloques de recursos asignados, y el servicio de voz sobre IP que demanda una capacidad de 12.2 Kbps por usuario, resultando una cantidad de suscriptores que pueden ser atendidos igual a 1831.

2.6 Conclusiones Parciales.

Para el desarrollo de este trabajo el software de simulación Atoll es el apropiado debido a que además de satisfacer las necesidades requeridas se disponen de licencias y mapas para la realización de proyectos y es utilizado desde hace algunos años por el Departamento de Servicios Móviles de Etecsa para el planeamiento y la optimización de sus redes de acceso.

Luego del acondicionamiento del Atoll y la introducción de los parámetros de las redes existentes 2G y 3G en el escenario de trabajo, se realizó la planificación del acceso LTE en la ciudad de Santa Clara, ofreciendo a los usuarios la posibilidad de mejores prestaciones, nuevos servicios y, por tanto, mejor calidad de su experiencia como usuarios móviles, proveyéndoles una interfaz de múltiples tecnologías de acceso 3GPP.

Se propuso incorporar 7 sitios para proveer acceso LTE, justificado en la condición de aprovechar la infraestructura y medios existentes, así como la escalabilidad del equipamiento ofrecido por los fabricantes que promueven las evoluciones graduales sin cambios significativos. El modelo de propagación elegido es el Hata-Cost 231 porque es el que más se ajusta al escenario objeto de estudio. La banda de frecuencia utilizada es la banda 3 con un ancho de banda de 10 MHz. El área de cobertura y el radio de la celda son función principalmente del tipo de modulación que se emplea.

Para el dimensionamiento LTE utilizando el Atoll se siguieron los siguientes pasos: recopilación de la información de la red, creación de un proyecto, importación de los datos de las redes 2G y 3G, creación y configuración de la red LTE, realización de predicciones de cobertura de acuerdo al nivel de señal, asignación automática de vecindades, frecuencias e identificadores de celdas, simulaciones de Monte Carlo, predicciones de cobertura de acuerdo al nivel y calidad de la señal y análisis de los resultados para en función de ello modificar o no los parámetros de la red definidos anteriormente.

Entre los principales resultados de las simulaciones de Monte Carlo están la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. Estos resultados son observados en el mapa y tablas que muestran estadísticamente los datos asociados a sitios, celdas y terminales.

La inclusión de LTE a este escenario permite aprovechar, por parte del operador, el espectro radioeléctrico de una manera más eficiente.

CAPITULO 3. ANÁLISIS Y EVALUACION DE LOS RESULTADOS

El escenario de trabajo se conforma a partir de una plantilla que contiene las tecnologías GSM, UMTS y LTE. Los datos de los sitios existentes GSM y UMTS son importados del escenario real en formato .xml. Luego se inserta la información geográfica de vectores, altura del terreno y clases de *clutter*. Se limita el área para reducir los cálculos computacionales con un polígono de 25.75 Km², que coincide aproximadamente con el área de cobertura de los 7 sitios de la ciudad de Santa Clara. Dentro de los parámetros de tráfico que se definen están los servicios, tipos de movilidad, terminales, perfiles de usuario y entornos. Se crea un mapa de tráfico que contiene la distribución de los usuarios en el área de interés y para este caso es posible decir que dada el área cuyas dimensiones son de 25.75 Km² y una cantidad de usuarios GSM de 37667 existen alrededor de 1463 usuarios/Km².



Figura 3.1. Escenario de trabajo. Ciudad de Santa Clara. Elaboración propia.

Para la configuración de los parámetros de la red de acceso LTE se ubican los sitios en el lugar donde se localizaban las tecnologías anteriores, por tanto, serán 7 radiobases LTE en la ciudad de Santa Clara. La plantilla para una radiobase LTE tendrá entre sus parámetros más significativos 3 sectores, un radio máximo de 1500 m, se define además el modelo de la antena y el modelo de propagación a emplear que será el Hata-Cost 231 expuesto anteriormente, la banda de frecuencia será E-UTRA banda 3 con un ancho de banda de 10 MHz y modo de duplexado FDD, la potencia de transmisión de 43 dBm, la altura de las antenas transmisoras es de 30 m y del receptor de 1.5 m.

Se realiza la asignación automática de vecindades entre las tres tecnologías, así como la asignación de frecuencias para LTE y la asignación automática de los identificadores de las celdas. Para las simulaciones se acondicionan ciertos parámetros de tráfico de manera que se aproxime el escenario de simulación a las condiciones reales de la ciudad de Santa Clara y de esta forma poder obtener resultados satisfactorios. Se crea además un mapa de tráfico cuyas propiedades dependen del entorno y los perfiles de usuarios definidos en los parámetros de tráfico.

3.1 Predicciones de Cobertura.

Las predicciones de cobertura comprenden estudios de nivel y calidad de la señal recibidos en cada punto del mapa, que permiten considerar la configuración inicial de la red sin tener en cuenta el tráfico.

3.1.1 Análisis del Nivel de Señal.

El primer análisis consiste en evaluar en LTE la cobertura por nivel de señal recibida en el enlace descendente en el escenario objeto de estudio, esto es el nivel de potencia total recibida en la banda teniendo en cuenta interferencia y ruido.

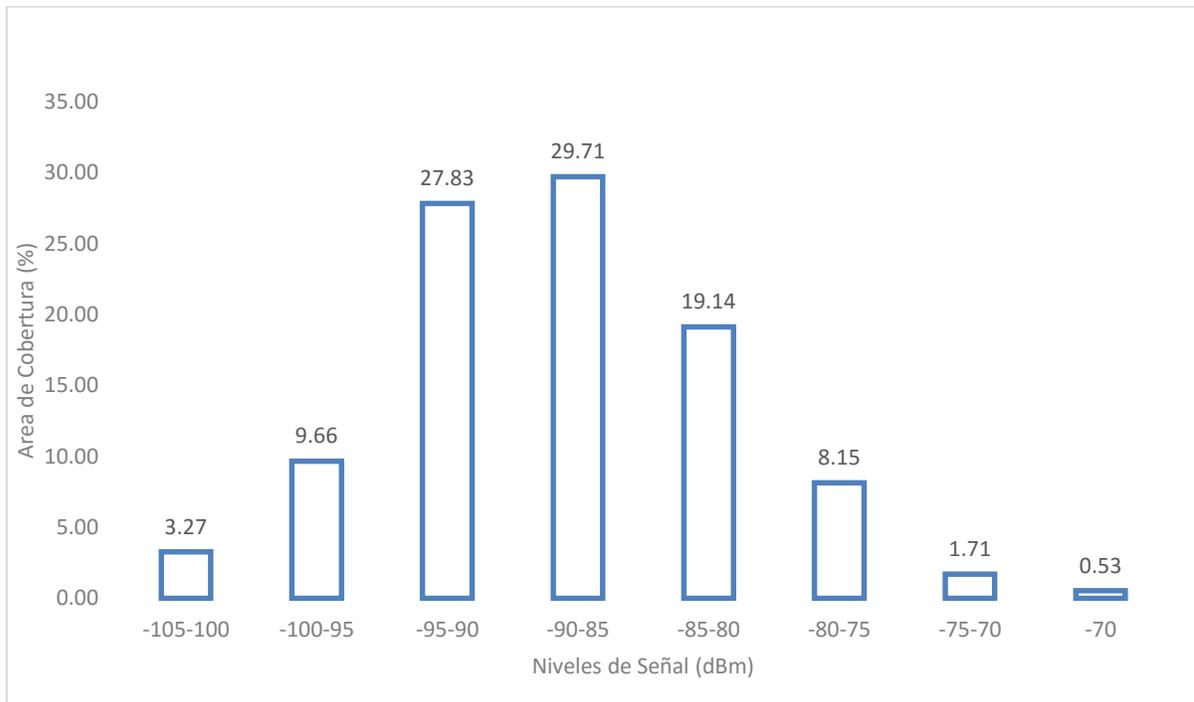


Figura 3.2. Nivel de señal LTE recibida en el enlace descendente. Elaboración propia.

En el gráfico se aprecia que aproximadamente el 59.23 % del área de cobertura contiene niveles de la señal superior a -90 dBm, el 37.50 % del área de cobertura contiene valores de -90 a -100 dBm, y el 3.27 % contiene niveles de señal recibida inferiores a -100 dBm. Con ello se estima que más del 96 % del área de cobertura posee niveles de señal recibida superior a -100 dBm. El valor medio es de -88.19 dBm y la desviación estándar es de 6.44 dBm.

Un mejor valor de nivel de señal recibido permite aprovechar de una manera más eficiente el canal de radio. Haciendo una comparación con los resultados teóricos obtenidos en el apartado 2.5.7 es posible

decir que los cálculos teóricos son más optimistas que los cálculos experimentales, lo que demuestra además que la precisión y el cálculo computacional son directamente proporcionales.

3.1.2 Análisis de Señal Efectiva.

Para este análisis se tienen en cuenta los valores de la potencia promedio por portadora LTE calculada sobre todas las señales de referencia (RSRP, *Reference Signal Received Power*) en el enlace descendente. Se selecciona además el tipo de movilidad peatonal y el servicio de internet de alta velocidad como condiciones para esta predicción. Este indicador es el habitual para expresar la cobertura en 4G y tiene un valor umbral típico de -118 dBm.

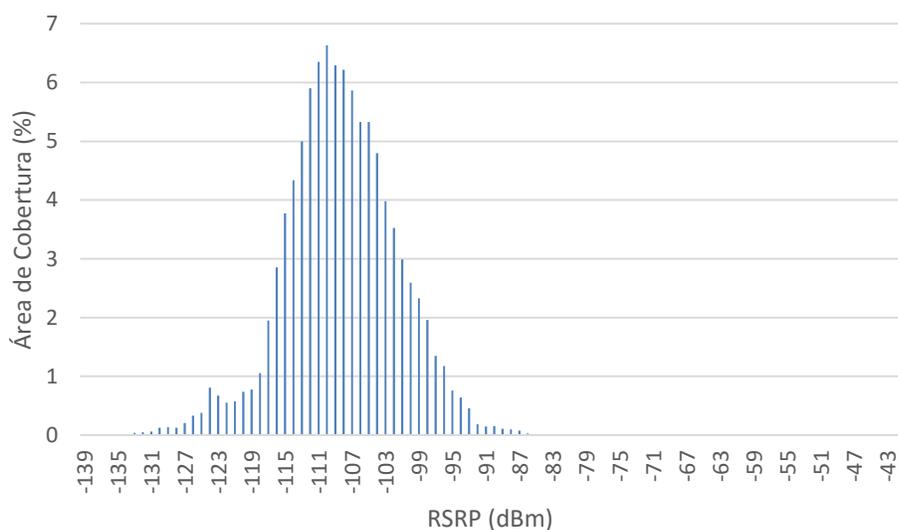


Figura 3.3. Nivel de señal recibida en valores de potencia de señal piloto. Elaboración propia.

En la Figura 3.3 se observa el valor que toma RSRP en toda el área de cobertura LTE. La señal posee un valor medio de -108.76 dBm y una desviación estándar de 6.79 dBm. Se aprecia además que el 95% del área de cobertura posee valores de RSRP menores o iguales a -118 dBm.

3.1.3 Análisis del Área de Servicio.

Esta predicción permite calcular y mostrar los mejores portadores de radio disponibles para cada píxel del mapa basados en los niveles de relación señal ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) de los mismos. El indicador de calidad del canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) es estandarizado por el 3GPP como la medida de calidad del canal descendente en el receptor móvil, el cual reporta a la estación base para la elección del esquema de modulación y codificación en la transmisión del enlace descendente.

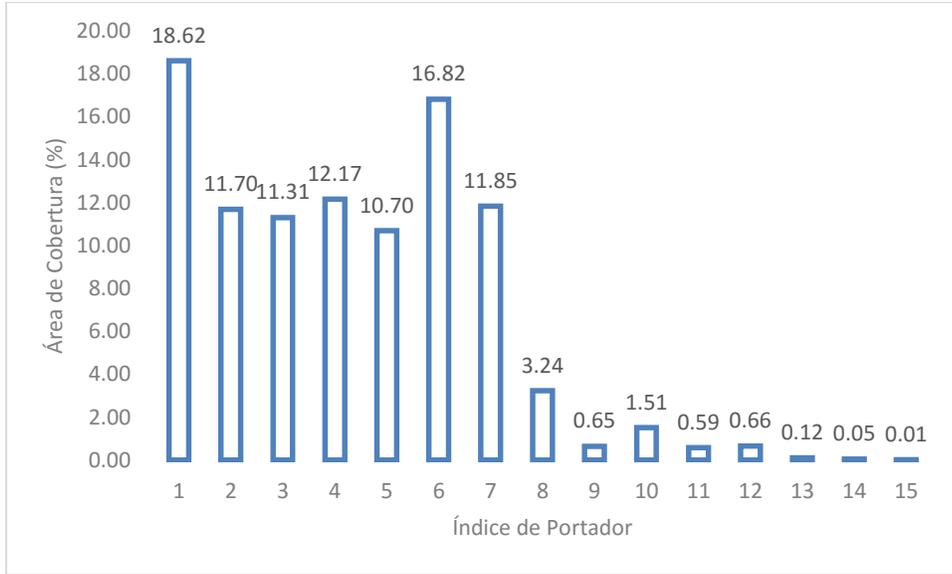


Figura 3.4. Portadores asignados en el área de cobertura. Elaboración propia.

En este análisis se observa que el 81.32 % del área de cobertura hace uso del esquema de modulación QPSK, el 15.74 % hace uso del esquema de modulación 16 QAM mientras el 2.95 % usa 64 QAM. El valor medio de los portadores de radio alcanzados en el escenario es 4.26 con una desviación estándar de 2.48.

Tabla 3.1. Análisis comparativo de cobertura por tipo de modulación. Elaboración propia.

Modulación	Cálculos teóricos (%)	Cálculos experimentales (%)
QPSK	80.60	81.32
16 QAM	10.54	15.74
64 QAM	8.85	2.95

De igual manera los cálculos teóricos son más optimistas que los resultados experimentales, considerando que el esquema de modulación más eficiente es más utilizado, haciendo referencia al esquema 64 QAM.

3.1.4 Análisis de la Relación Señal Interferencia más Ruido.

Este análisis está orientado a la percepción de la calidad de la señal en el área de cobertura y permite predecir los niveles de portadora a interferencia más ruido para cada píxel del mapa. Este parámetro está estrechamente relacionado con la velocidad ofrecida al usuario. El valor de SINR determina el máximo esquema de modulación y codificación utilizable en la transmisión que permita cumplir con el objetivo de BLER, Cuanto mayor sea el esquema MCS mayor será la eficiencia espectral del enlace y por tanto la velocidad de transmisión, pero mayor será la calidad requerida en el enlace.

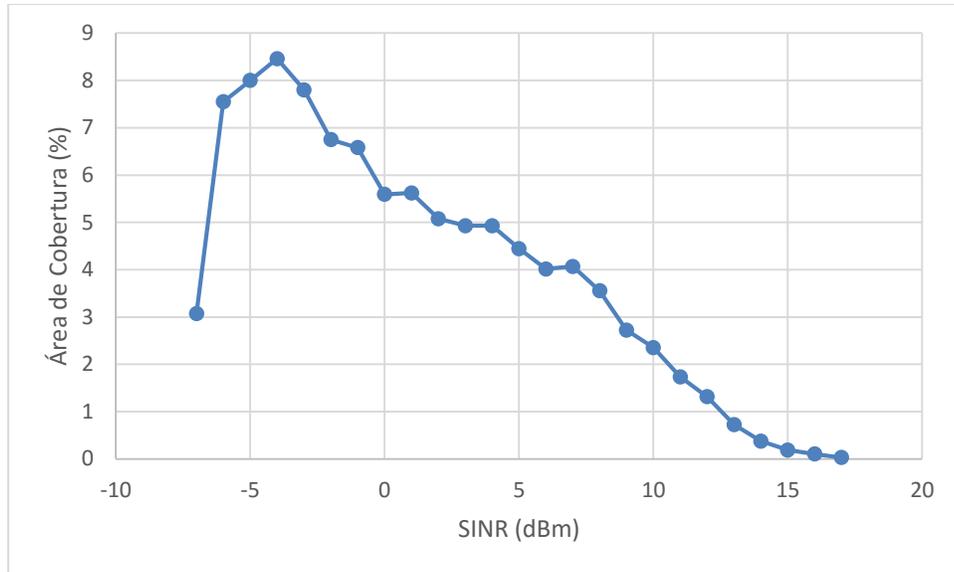


Figura 3.5. SINR en el enlace descendente. Elaboración propia.

En la Figura 3.5 se observa que el valor medio de SINR es 1.22 dBm y la desviación estándar es 5.26 dBm. Es apreciable además que el 81.38 % del área de cobertura contiene valores superiores a -5 dBm, valor umbral tipo para redes LTE con un ancho de banda de 10 MHz y para una cobertura del 75 %.

3.1.5 Análisis de Cobertura por Throughput.

Este análisis permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa el *throughput* de los canales y la capacidad de la celda basado en los niveles de SNR y en los portadores de radio disponibles. Además, permite mostrar el *throughput* agregado de la celda para resultados de simulaciones.

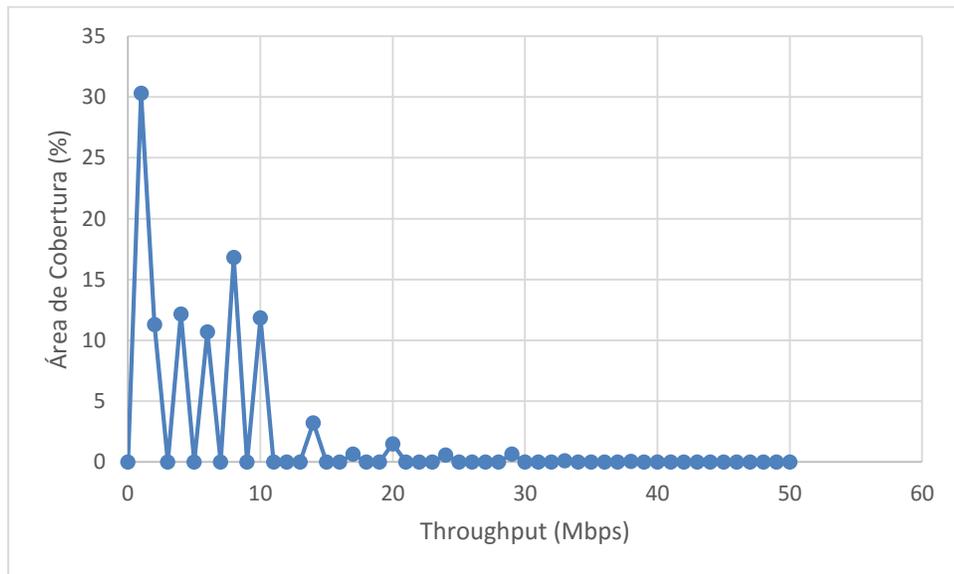


Figura 3.6. Cobertura por throughput en el enlace descendente. Elaboración propia.

Se observa que aproximadamente el 93 % del área de cobertura alcanza valores de throughput de hasta 10 Mbps. El valor medio de throughput alcanzado es de 6.04 Mbps y la desviación estándar es de 5.06 Mbps.

Tabla 3.2. Comparación área cubierta por throughput. Elaboración propia.

Throughput	Cálculos teóricos (%)	Cálculos experimentales (%)
> 10.6 Mbps	19.4	6.8

En la Tabla 3.2 se aprecia una vez más el carácter optimista de los cálculos teóricos por sobre los cálculos experimentales. Los cálculos teóricos expresan que el 19.4 % del área de cobertura permite alcanzar un throughput superior a 10.6 Mbps mientras que los cálculos experimentales muestran que solamente es el 6.8 % del área de cobertura.

3.1.6 Análisis de Cobertura por Indicador de Calidad.

Esta predicción permite calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad como lo es el BLER, basado en los portadores de radio y en los niveles de SNR de cada píxel. El terminal de usuario mide las señales de referencias provenientes del eNB y de esta medida estima la SNR del canal descendente para luego notificarle al eNB mediante señalización de retorno un valor de CQI que asegure una tasa de error de bloque menor o igual al 10 %. Este valor notificado trae consigo la selección del esquema de modulación y codificación. De esta forma se tienen en cuenta las características del receptor y del canal.

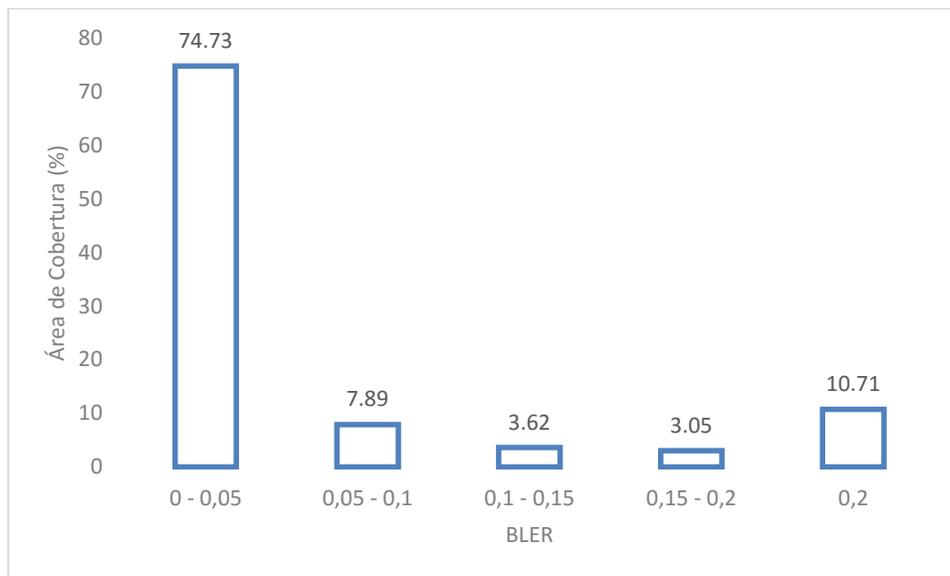


Figura 3.7. Cobertura por indicador de calidad del canal. Elaboración propia.

En este análisis se observa que el 83 % del área de cobertura posee un BLER menor o igual a 0.1, con un valor medio de 0.07 y una desviación estándar de 0.15.

3.2 Simulaciones de Tráfico.

Las simulaciones permiten analizar el desempeño de la red dimensionada desde el punto de vista de tráfico. Los principales resultados de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, así como la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. Los resultados de dichas simulaciones pueden ser observados en el mapa y en tablas que muestran las estadísticas de las simulaciones además de datos asociados a los sitios, celdas y terminales.

3.2.1 Parámetros de Tráfico.

Para las simulaciones es necesario establecer una serie de parámetros de tráfico relacionados con el servicio, tipo de movilidad, terminales, perfiles de usuarios y entornos.

Tabla 3.3. Demanda máxima de throughput por tipos de servicios. Elaboración propia.

Servicios	Ascendente (Kbps)	Descendente (Kbps)
Internet de alta velocidad	128	1024
Acceso internet móvil	64	128
VoIP	12,2	12,2

Tabla 3.4. Tipos de movilidad. Elaboración propia.

Tipo de Movilidad	Velocidad Promedio
Peatonal	3 Km/h
50 Km/h	50 Km/h
90 Km/h	90 Km/h

Tabla 3.5. Tipo de Terminal LTE. Elaboración propia.

Tipo de Terminal	Categoría	Figura de Ruido	Potencia de Trasmisión
Terminal LTE	5	7 dB	23 dBm

Tabla 3.6. Perfiles de usuarios LTE. Elaboración propia.

Perfiles de Usuario	Servicio	Tipo de Terminal	Llamadas/hora	Duración (s)	Ascendente (Kbps)	Descendente (Kbps)
Usuario LTE de Internet HS	Internet de alta velocidad	Terminal LTE	0,05		2000	15000
Usuario LTE	Acceso	Terminal	0,1		700	4500

de Acceso Móvil	internet móvil	LTE		
Usuario LTE de VoIP	VoIP	Terminal LTE	0,79	29

Tabla 3.7 Entornos utilizados. Elaboración propia.

Entornos	Movilidad	Densidad de Usuarios por Km ²
Santa Clara LTE Internet HS	Peatonal	586
Santa Clara LTE Internet Móvil	Peatonal	586
Santa Clara LTE VoIP	Peatonal	586

El número de simulaciones requeridas para garantizar la confiabilidad de los resultados es 1850, esta aseveración está justificada en el epígrafe 2.4. Se estima una densidad de usuarios de 586 usuarios LTE por Km², valor que constituye el 40 % de los usuarios móviles actuales en el escenario de estudio y que se estima de acuerdo con las tendencias en las redes móviles actuales.

3.2.2 Throughput por Radiobase.

Para este análisis se tienen en cuenta cada uno de los sitios dimensionados además de los parámetros de tráfico descritos anteriormente en el apartado 3.2.1, por tanto, se analiza el throughput de cada radiobase considerando los tres tipos de servicios mencionados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.8. Throughput por servicio en el enlace descendente. Elaboración propia.

Sitios	Internet de alta velocidad (Kbps)	Internet móvil (Kbps)	VoIP (Kbps)
12 PLANTAS	9.910,62	3.520,15	74,04
AIT	5.143,89	2.031,91	48,42
CAMACHO CT	8.520,21	3.197,88	74,05
CONDADO NORTE	7.624,46	2.773,17	62,9
GERENCIA VCL	8.593,96	2.913,32	57,15
SANTA CLARA CT	5.732,66	2.317,40	55,03
URA LA SALUD	9.370,45	3.288,48	69,45
<i>Usuarios conectados</i>	<i>206,21</i>	<i>314,21</i>	<i>91,8</i>
<i>%</i>	<i>99,7</i>	<i>99,70</i>	<i>99,5</i>
<i>Desviación estándar</i>	<i>14,21</i>	<i>17,42</i>	<i>9,51</i>
<i>Intervalo de confianza</i>	<i>0,85</i>	<i>1,04</i>	<i>0,57</i>

En este experimento resulta que casi la totalidad de los usuarios que intentaron acceder a los servicios tuvieron éxito, por lo que se puede decir que la red tiene un buen desempeño cuyo grado de servicio es inferior al 2 %. Los valores de throughput que se muestran son valores efectivos en el enlace descendente. La confiabilidad en los resultados de las simulaciones queda demostrada en los valores del intervalo de confianza calculado para cada servicio, donde se tuvo en cuenta la desviación estándar de usuarios, el número de simulaciones y el valor crítico que depende del nivel de confianza, estimado para una probabilidad de ocurrencia de las mediciones de un 99 %.

3.3 Conclusiones Parciales.

En este capítulo se analizó el dimensionamiento de la red de acceso LTE en el escenario de la ciudad de Santa Clara, y para su evaluación se realizaron varias predicciones que permitieron apreciar el nivel y la calidad de las señales de radio de la red de acceso LTE para los siete sitios en los 25.75 Km². Se realizaron además tres simulaciones para evaluar el desempeño de la red desde el punto de vista de tráfico de acuerdo al tipo de servicio que se ofrecía. Este análisis permitió llegar a las siguientes conclusiones:

Los cálculos teóricos difieren de los cálculos experimentales en este tipo de dimensionamiento fundamentalmente por la cantidad de elementos que son tenidos en cuenta, por lo que se demuestra que el cálculo computacional y la precisión son directamente proporcionales.

Los valores resultantes de los cálculos experimentales del RSSI, RSRP, SINR, CQI, SINR, y BLER cumplen con los umbrales y valores medios típicos para este tipo de escenario, así como su comportamiento en toda el área de cobertura.

El desempeño de la red desde el punto de vista de tráfico supera el 99.5% para los servicios y perfiles que le fueron demandados.

CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación se arribó a las siguientes conclusiones:

1. Las redes móviles inciden fuertemente en el desarrollo de las sociedades actuales formando parte de un estrecho vínculo entre tecnología y sociedad. Las evoluciones de las redes móviles implican cambios en comportamientos sociales, dígase el acceso a un nuevo servicio, o contenido, la mejora en la calidad del servicio, la mejora en la calidad de la experiencia del usuario, ente otros aspectos, lo que despierta gran interés y hace que esta relación se sostenga. Las evoluciones móviles tienen una periodicidad de aproximadamente 10 años.
2. Las redes LTE constituyen hoy la tecnología madura de mejores prestaciones en el mercado lo que la hace ser la tecnología a elegir por la mayoría de los operadores que evolucionan sus redes. Estas redes tienen varias ventajas entre las que se encuentran principalmente la eficiencia espectral permitiendo alcanzar altas velocidades de transmisión de datos, y bajas latencias, gran escalabilidad y como otra fortaleza es una red orientada a IP.
3. Una vez considerada la herramienta de simulación para el dimensionamiento se determinó la elección del Atoll por la disponibilidad de licencias, mapas y experiencia en su utilización. Como parte del Atoll las simulaciones de Monte Carlo juegan un papel fundamental y como elemento que se destaca está la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. Durante la planificación de la red de acceso LTE fueron considerados puntos significativos como el modelo de propagación, la banda de frecuencia, el balance del enlace, el ancho de banda, el área de cobertura, el radio de la celda, la capacidad de la celda y la cantidad de usuarios. Se consideró además la realización de un análisis estadístico que permitió garantizar la confiabilidad de los resultados de las simulaciones.
4. Los resultados del dimensionamiento fueron analizados y evaluados de acuerdo a predicciones por nivel y calidad de las señales asociadas con el acceso LTE, dígase análisis del nivel de señal, análisis de señal efectiva, análisis de área de servicio, análisis de relación señal interferencia más ruido, análisis de cobertura por throughput y análisis de cobertura por indicador de calidad del canal. Se realizaron además simulaciones de tráfico donde se tuvieron en cuenta parámetros de tráfico tales como: servicios, tipos de movilidad, tipos de terminal, perfiles de usuarios y entornos.

RECOMENDACIONES

Debido a la complejidad del dimensionamiento de este tipo de redes de acceso se recomienda:

Continuar investigando sobre métodos y procedimientos de dimensionamiento de redes de acceso LTE que garanticen el equilibrio entre el proveedor y el usuario, y de esta manera acercar los cálculos y estimaciones teóricas y experimentales a escenarios reales.

En el caso concreto de la interoperatividad de las redes de acceso 3GPP involucradas en este escenario se constató que la red de acceso 3G actualmente en servicio pudiera ser optimizada.

Evaluar para este escenario otros modelos de propagación lo que pudiera permitir obtener una estimación más fiel de la realidad.

Optimizar la red LTE propuesta en función de favorecer la heterogeneidad del escenario, respetando las tendencias universales de mantener las redes tradicionales como fondo de los servicios móviles.

GLOSARIO DE TERMINOS

2G	Segunda Generación en las redes de telefonía móvil. Hace referencia al estándar GSM
3G	Tercera generación en las redes de telefonía móvil. Hace referencia al estándar UMTS
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Cuarta Generación en las redes de telefonía móvil. Hace referencia al estándar LTE
64 QAM	64 Quadrature Amplitude Modulation
ADP	Asynchronous Distributed Pricing
AMPS	Advanced Mobile Phone System
BLER	Block Error Rate
CAGR	Compound Anual Growth Rate
CDMA2000 1X/EVDO	Evolution-Data Only, es un estándar de telecomunicaciones para la transmisión inalámbrica de datos a través de señales de radio, típicamente para acceso a internet banda ancha. Estandarizado por el 3GPP2 como parte de la familia de estándares CDMA-2000
CDMAOne	Code Division Multiple Access. Interim Standard 95 (IS-95). Es el primer estándar celular digital basado en CDMA. Conocido como TIA-EIA-95.
CPE	Customer Premises Equipment
CQI	Channel Quality Indicator
CRRM	Common Radio Resource Management
CS	Circuit Switching
D-AMPS	Digital Advanced Mobile Phone System
DFT	Discrete Fourier Transform
EARFCN	E-UTRAN Absolute Radio Frequency Channel Number
EDGE	Enhanced Data for GSM
eNB	Evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPRE	Energy Per Resource Element
EPS	Evolved Packet System

E-UTRAN	Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frecuency Division Duplex
GERAN	GPRS\EDGE Radio Access Network
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GIS	Geographic Information System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HD	High Definition
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
ICIC	Intercell Interference Coordination
iDEN	Integrated Digital Enhanced Network
iFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
IP	Internet Protocol
IS-136	Interim Standard 136
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
JTACS	Japan Total Access Communications System
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
NMT	Nordic Mobile Telephone
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frecuency Division Multiple Access
ONEI	Oficina Nacional de Estadística e Información
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel

PDC	Personal Digital Cellular
PDCCH	Physical Down Link Control Channel
PDSCH	Physical Down Link Shared Channel
PRB	Physical Resource Block
PS	Packet Switching
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature phase-shift keying
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Received Reference Signal Energy per Resource Element
RTMI	Radio Telefono Mobile Integrato
SC-FDMA	Single-carrier Frequency Division Multiple Access
SFR	Soft Frequency Reuse
S-GW	Serving Gateway
SNR	Signal to Noise Ratio
TACS	Total Access Communications System
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UHF	Ultra-high frequency
UIT	International Telecommunication Union
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] «LTE». [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Accedido: 30-jun-2016].
- [2] Ramon Agusti Comes Francisco Bernarndo Alvarez, Fernando Casadevall Palacio, Ramon Ferrús Ferre, Jordi Pérez Romero, Oriol Sallent Roig, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Fundación Vodafone España. 2012.
- [3] S. Seven, R. P. Astuti, y B. Prasetya, «Design and simulation of LTE radio system for broadband wireless access in central Phnom Penh», en *2015 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 2015, pp. 223-228.
- [4] Claudio Feijoo, «Una vía de doble sentido. Comunicaciones móviles y sociedad», *Telos*, vol. 84, 2010.
- [5] «ITU | 2015 Global ICT Development Index». [En línea]. Disponible en: <http://www.itu.int/net4/ITU-D/idi/2015/#>. [Accedido: 05-abr-2016].
- [6] Do Van Thanh, Ivar Jorstad, «Future Mobile Phones», *Telektronik*, vol. 101, n.º 3/4, pp. 3-21, 2005.
- [7] «Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper - Cisco». [En línea]. Disponible en: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. [Accedido: 05-abr-2016].
- [8] Jasmeet Singh Sethi, Peter Jonsson, Stephen Carson, «Ericsson Mobility Report MWC Edition», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ericsson.com/res/docs/2016/mobility-report/ericsson-mobility-report-feb-2016-interim.pdf>. [Accedido: 06-abr-2016].
- [9] Stephen Carson, Péter Kersch, Per Lindberg, Elena Fersman, Craig Donovan, Athanasios Karapantelakis, Matilda Gustafsson, Leonid Mokrushin, Jens Malmmodin, Olivia Thell, Erik Westerberg, y Ove Persson, Git Sellin, Jonas Edstam, Kati Öhman, Rafia Inam, «Ericsson Mobility Report», 2015. [En línea]. Disponible en: www.ericsson.com. [Accedido: 06-abr-2016].
- [10] Forest Stewar y dship Council (FSC), «Annual Report Verizon», 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.verizon.com/about/sites/default/files/annual/verizon-annual-2015/downloads/15_vz_ar.pdf. [Accedido: 06-abr-2016].
- [11] «3GPP specification series: 23series». [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23-series.htm>. [Accedido: 30-jun-2016].
- [12] «3GPP specification series: 36series». [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36-series.htm>. [Accedido: 11-may-2016].
- [13] «R-REC-M.1035-0-199403-I!!PDF-E.pdf». [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1035-0-199403-I!!PDF-E.pdf. [Accedido: 04-ago-2016].
- [14] K. Johansson, A. Furuskar, y C. Bergljung, «A Methodology for Estimating cost and Performance of Heterogeneous Wireless Access Networks Special Session Paper», en *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2007, pp. 1-5.
- [15] F. Gordejuela-Sanchez y J. Zhang, «LTE Access Network Planning and Optimization: A Service-Oriented and Technology-Specific Perspective», en *IEEE Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009*, 2009, pp. 1-5.

- [16] Z. Li y S. Li, «LTE network planning based on game theory», en *2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS)*, 2011, pp. 3963-3966.
- [17] C. Shi, R. A. Berry, y M. L. Honig, «Distributed interference pricing for OFDM wireless networks with non-separable utilities», en *42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2008. CISS 2008*, 2008, pp. 755-760.
- [18] D. D. Bobkov, A. S. Zgurkiy, O. S. Kozlov, M. A. Kolomichev, A. L. Sakhnevich, y M. A. Sklyar, «3GPP LTE access network planning», en *2010 20th International Crimean Conference «Microwave Telecommunication Technology»*, 2010, pp. 433-434.
- [19] «ICS Designer | ATDI». [En línea]. Disponible en: <http://www.atdi.com/ics-designer/>. [Accedido: 18-may-2016].
- [20] K. Majewski y M. Koonert, «Conservative Cell Load Approximation for Radio Networks with Shannon Channels and its Application to LTE Network Planning», en *2010 Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT)*, 2010, pp. 219-225.
- [21] J. Gu, Y. Ruan, X. Chen, y C. Wang, «A novel traffic capacity planning methodology for LTE radio network dimensioning», en *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, 2011, pp. 462-466.
- [22] S. Louvros, K. Aggelis, y A. Baltagiannis, «LTE cell coverage planning algorithm optimising uplink user cell throughput», en *Proceedings of the 2011 11th International Conference on Telecommunications (Con^{TEL})*, 2011, pp. 51-58.
- [23] L. Decreusefond, E. Ferraz, P. Martins, y T. T. Vu, «Robust methods for LTE and WiMAX dimensioning», en *2012 6th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS)*, 2012, pp. 74-82.
- [24] «Expansiones de Edgeworth», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 22-may-2014.
- [25] M. Jaloun y Z. Guennoun, «Mathematical model for LTE system dimensioning», en *2012 Next Generation Networks and Services (NGNS)*, 2012, pp. 169-176.
- [26] «CPLEX Optimization - Mixed-Integer Optimization». [En línea]. Disponible en: <http://www.cplex.co/>. [Accedido: 19-may-2016].
- [27] M. A. Kolomytsev y V. V. Korsak, «Planning of LTE network in urban areas», en *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2012 22nd International Crimean Conference*, 2012, pp. 304-305.
- [28] G. Giambene y T. A. Yahiya, «LTE planning for Soft Frequency Reuse», en *Wireless Days (WD), 2013 IFIP*, 2013, pp. 1-7.
- [29] G. E. Athanasiadou, D. Zarbouti, y G. V. Tsoulos, «Automatic location of base-stations for optimum coverage and capacity planning of LTE systems», en *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, 2014, pp. 2077-2081.
- [30] F. Furqan, D. B. Hoang, y I. B. Collings, «Effects of quality of service schemes on the capacity and dimensioning of LTE networks», en *2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*, 2014, pp. 1-8.
- [31] V. Passas, N. Makris, S. Keranidis, T. Korakis, y L. Tassioulas, «Towards the efficient performance of LTE-A systems: Implementing a cell planning framework based on cognitive sensing», en *2014 1st International Workshop on Cognitive Cellular Systems (CCS)*, 2014, pp. 1-5.

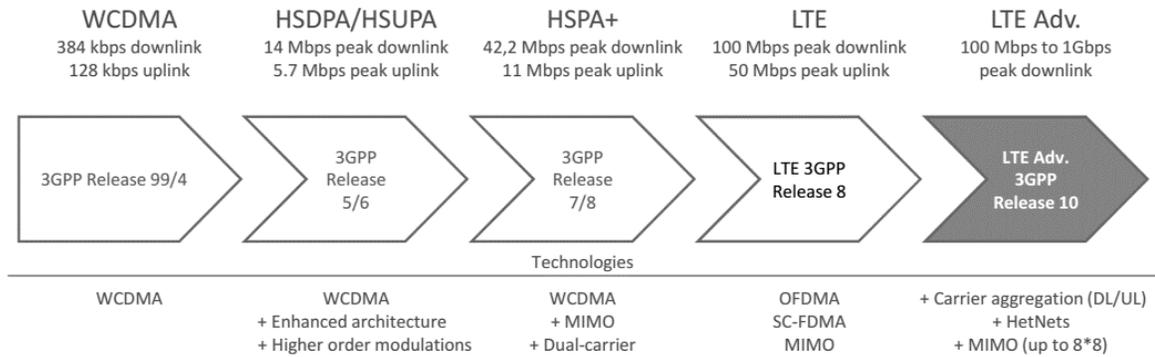
- [32] A. Pastrav, H. Ene, A. Bara, T. Palade, y E. Puschita, «Deploying an LTE cell in an urban area: Planning and traffic performance analysis», en *2014 11th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 2014, pp. 1-4.
- [33] E. Yaacoub, A. Imran, y Z. Dawy, «A generic simulation-based dimensioning approach for planning heterogeneous LTE cellular networks», en *MELECON 2014 - 2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 2014, pp. 320-326.
- [34] D. Ageyev y A. Al-Ansari, «LTE RAN and services multi-period planning», en *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S T), 2015 Second International Scientific-Practical Conference*, 2015, pp. 272-274.
- [35] E. Kavurmacioglu y D. Starobinski, «Network dimensioning with carrier aggregation», en *2015 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2015, pp. 336-347.
- [36] L. Panxing, W. Jing, y F. Jie, «An algorithm of DL cell throughput based on MCS level in LTE network», en *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2015, pp. 1-5.
- [37] «UBC Radio Science Lab». [En línea]. Disponible en: <http://rsl.ece.ubc.ca/planning.html>. [Accedido: 20-may-2016].
- [38] Nichole, «Mentum Planet», *InfoVista*, 04-jun-2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.infovista.com/products/Mentum-Planet-Live-RF-planning-and-optimization>. [Accedido: 20-may-2016].
- [39] «Métodos para el aumento de la capacidad UMTS en Atoll», 2012, pp. 75-112.
- [40] «Herramientas de cálculos». [En línea]. Disponible en: <http://med.unne.edu.ar/biblioteca/calculos/calculadora.htm>. [Accedido: 30-ago-2016].
- [41] «Intervalo de confianza», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 03-jun-2016.
- [42] «Oficina Nacional de Estadísticas. Cuba. Población.» [En línea]. Disponible en: <http://www.one.cu/aec2014/03%20Poblacion.pdf>. [Accedido: 06-may-2016].
- [43] «P.525-2 - Cálculo de la atenuación en el espacio libre - R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf». [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf. [Accedido: 22-jul-2016].
- [44] «Template BR_Rec_2005.dot - R-REC-M.1641-1-200603-I!!PDF-S.pdf». [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1641-1-200603-I!!PDF-S.pdf. [Accedido: 22-jul-2016].
- [45] «A theoretical model of UHF propagation in urban environments - Antennas and Propagation, IEEE Transactions on - walfisch.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://iie.fing.edu.uy/~flarroca/papers/walfisch.pdf>. [Accedido: 29-jul-2016].
- [46] «Propagation data and prediction methods for the planning of short - range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz». 2015.
- [47] «www.3gpp.org - /ftp/specs/archive/36_series/36.101/». [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.101/. [Accedido: 22-jul-2016].
- [48] 3GPP, «3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8)». 2009.

- [49] Telefónica, «Capa Física y Planificación en LTE», Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [50] «Atoll Radio Planning Software - Overview - Forsk», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.forsk.com/atoll/>. [Accedido: 23-mar-2016].
- [51] Forsk, «Atoll Radio Planning & Optimisation Software». 2013.
- [52] B. N. F. Campo, «Impacto del reuso de frecuencia fraccional en la reducción de interferencia intercelda en LTE.», *Rev. Investig. Univ. QUINDIO*, vol. 1, n.º 25, feb. 2016.

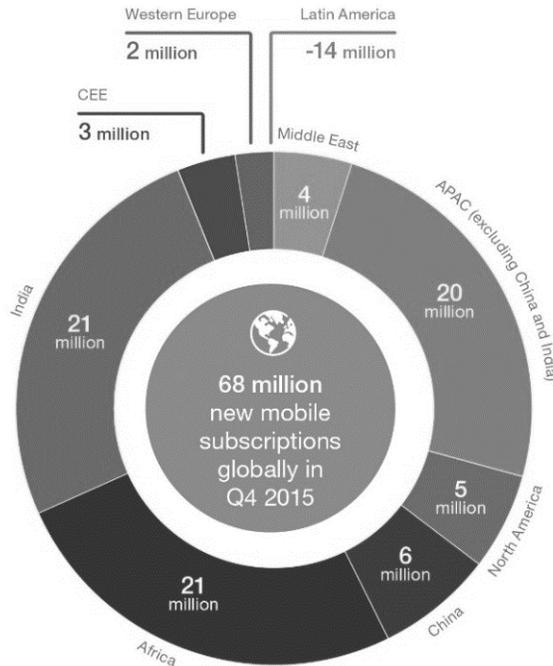
ANEXOS

Anexo I. Evolución del estándar 3GPP. Tomado de [50].

- Release 99: UMTS FDD (3G)
- Release 4: UMTS TDD + FDD repeaters (3G)
- Release 5: HSDPA (3.5G)
- Release 6: HSUPA (enhanced uplink) + MBMS (3.5G)
- Release 7: HSPA+ (2x2 MIMO, higher order modulations, etc.) (3.75G)
- Release 8: LTE FDD and TDD (3.9G) + HSPA+ multi-carrier
- Release 10: LTE advanced (4G)



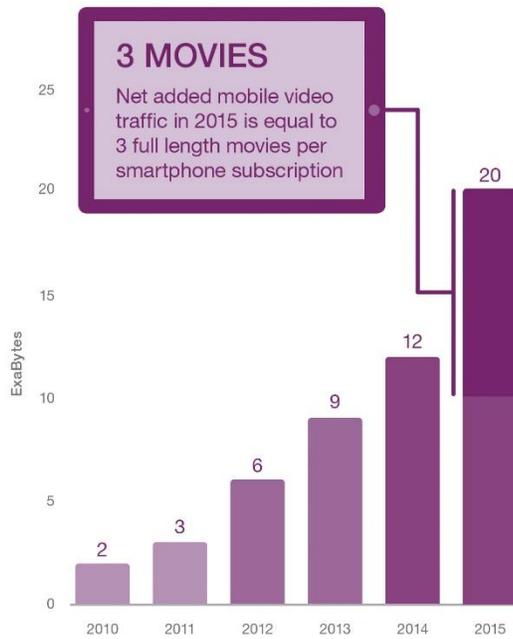
Anexo II. Crecimiento de suscripciones por regiones. Tomado de [8].



Note: The decline in mobile subscriptions for Latin America is due to the economic headwinds in the region and to a continued significant decrease/cleanout of prepaid subscriptions in Brazil

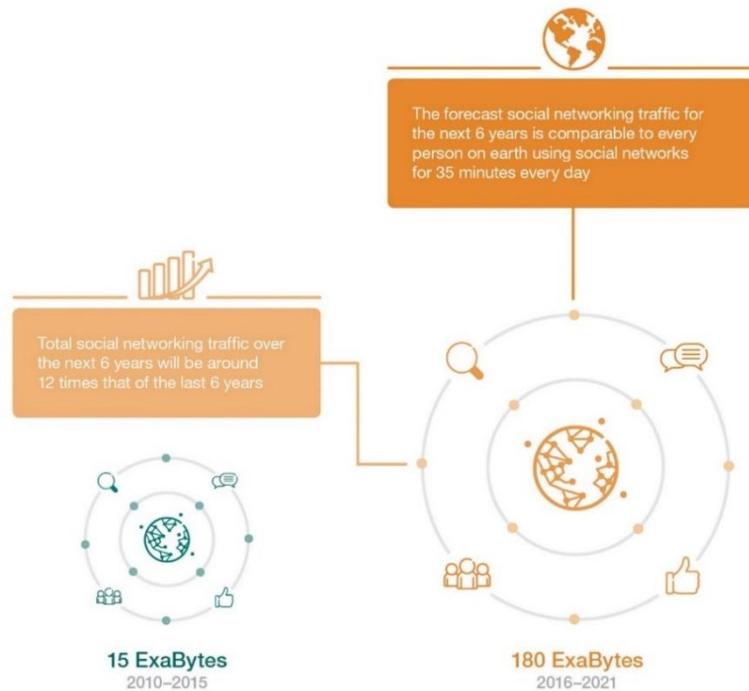
Anexo III. Tráfico agregado de datos móviles. Tomado de [9].

Yearly net added mobile data traffic²



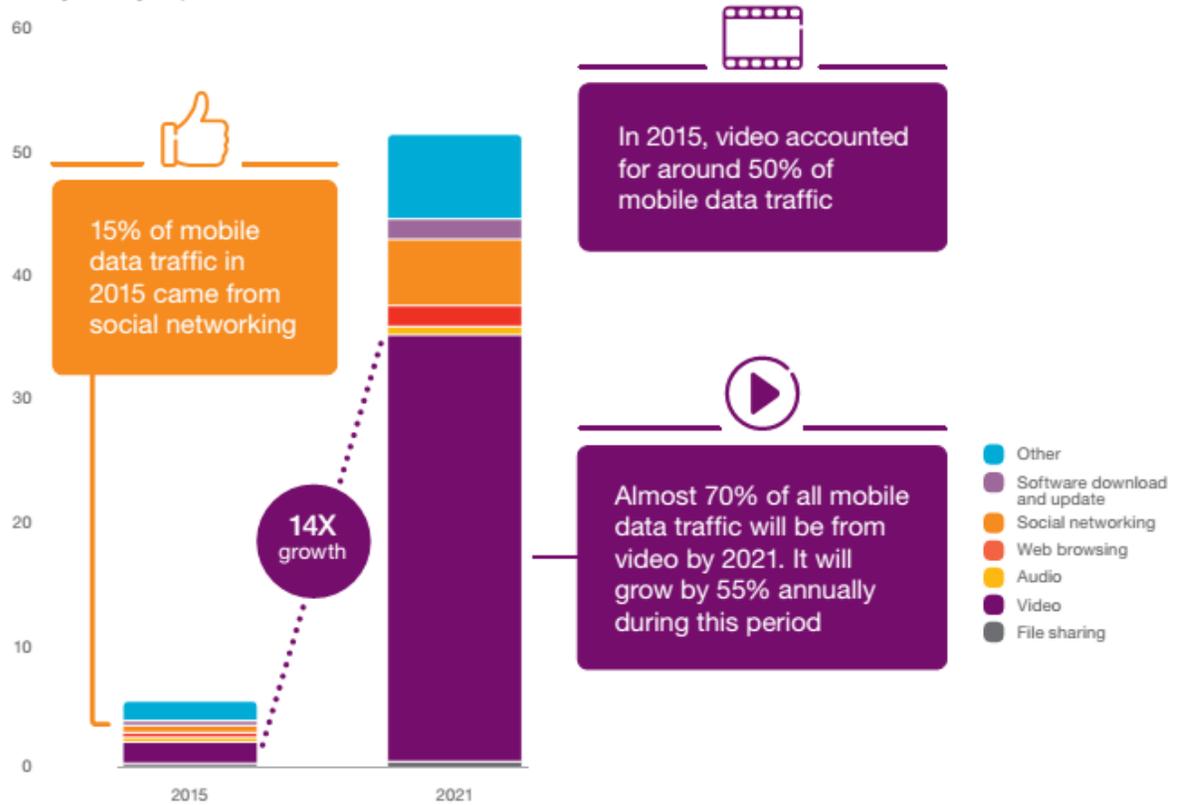
² Traffic does not include DVB-H, Wi-Fi, or Mobile WiMAX

Anexo IV. Tráfico acumulado de redes sociales. Tomado de [8].



Anexo V. Variación de tráfico de datos móviles por tipo. Tomado de [8].

Mobile data traffic by application type (monthly ExaBytes)



¹ This is based on Ericsson measurements in a selected number of commercial networks in Asia, Europe and the Americas

² Video is also likely to form a major part of file sharing traffic in addition to the identified application type "video"

³ Ericsson ConsumerLab, TV and Media (2015)

Anexo VI. Indicadores de tráfico y suscripciones. Tomado de [9].

KEY FIGURES

*Monthly data traffic volumes by year end
**Active devices

Mobile subscription essentials	2014	2015	2021 forecast	CAGR 2015–2021	Unit
Worldwide mobile subscriptions	7,100	7,400	9,100	5%	million
> Smartphone subscriptions	2,600	3,400	6,400	10%	million
> Mobile PC, tablet and mobile router subscriptions	250	250	350	5%	million
> Mobile broadband subscriptions	2,900	3,600	7,700	15%	million
> Mobile subscriptions, GSM/EDGE-only	4,000	3,600	1,300	-15%	million
> Mobile subscriptions, WCDMA/HSPA	1,900	2,200	3,200	5%	million
> Mobile subscriptions, LTE	500	1,000	4,100	25%	million
> Mobile subscriptions, 5G			150		million

Traffic essentials*	2014	2015	2021 forecast	CAGR 2015–2021	Unit
> Monthly data traffic per smartphone**	1.0	1.4	8.5	35%	GB/month
> Monthly data traffic per mobile PC**	4.0	5.8	20	25%	GB/month
> Monthly data traffic per tablet**	1.8	2.6	9.7	25%	GB/month
Total monthly mobile data traffic	3.2	5.3	51	45%	EB/month
Total monthly fixed data traffic	50	60	150	20%	EB/month

Mobile traffic growth forecast	Multiplier 2015–2021	CAGR 2015–2021
All mobile data	10	45%
> Smartphones	11	50%
> Mobile PC	3	20%
> Tablets	7	35%

Monthly data traffic per smartphone**	2015	2021	Unit
> Western Europe	2.0	18	GB/month
> Central and Eastern Europe	1.4	6.9	GB/month
> Middle East and Africa	1.1	6.3	GB/month
> Asia Pacific	1.0	6.9	GB/month
> North America	3.8	22	GB/month
> Latin America	1.2	6.0	GB/month

Anexo VII. Algoritmo de censado del espectro. Tomado de [31].

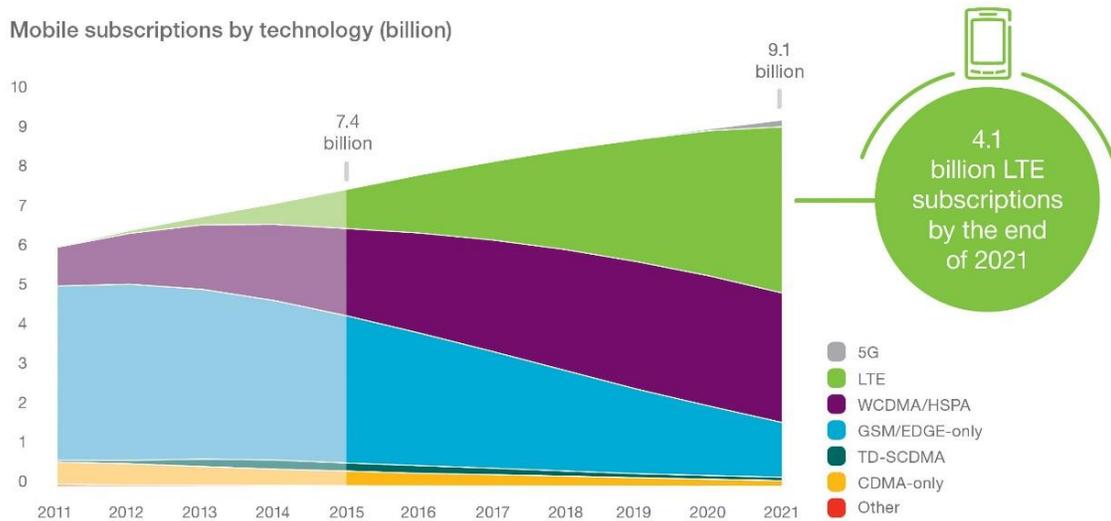
Algorithm 1 Frequency Selection Policy

```

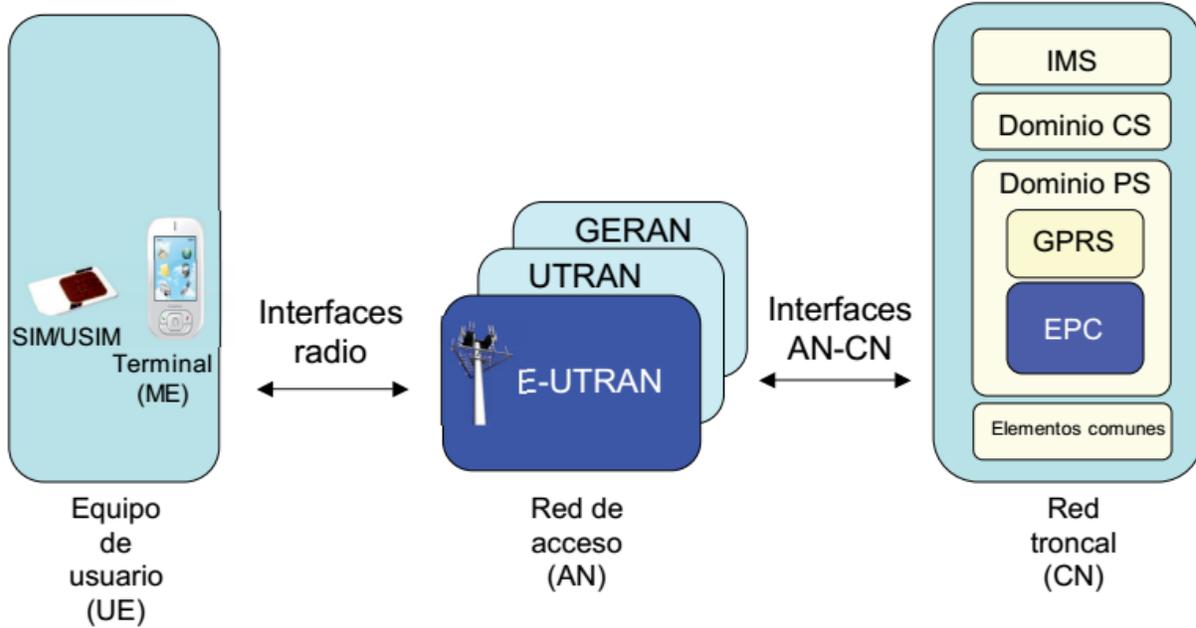
1: Threshold = Init
2: Interval = t
3: while 1 do
4:   while InterferenceDetected  $\geq$  Threshold do
5:     Do Energy Detection in the Femto Cell Operating
     Frequency
6:     if Transmissions are Detected then
7:       Scan the band
8:       Determine the least occupied channel
9:       Instruct Femto to use to this channel
10:    else
11:      Use the current Frequency
12:    end if
13:    Readjust(Threshold, Interval)
14:  end while
15:  sleep(Interval)
16: end while

```

Anexo VIII. Suscripciones móviles por tecnología. Tomado de [8].

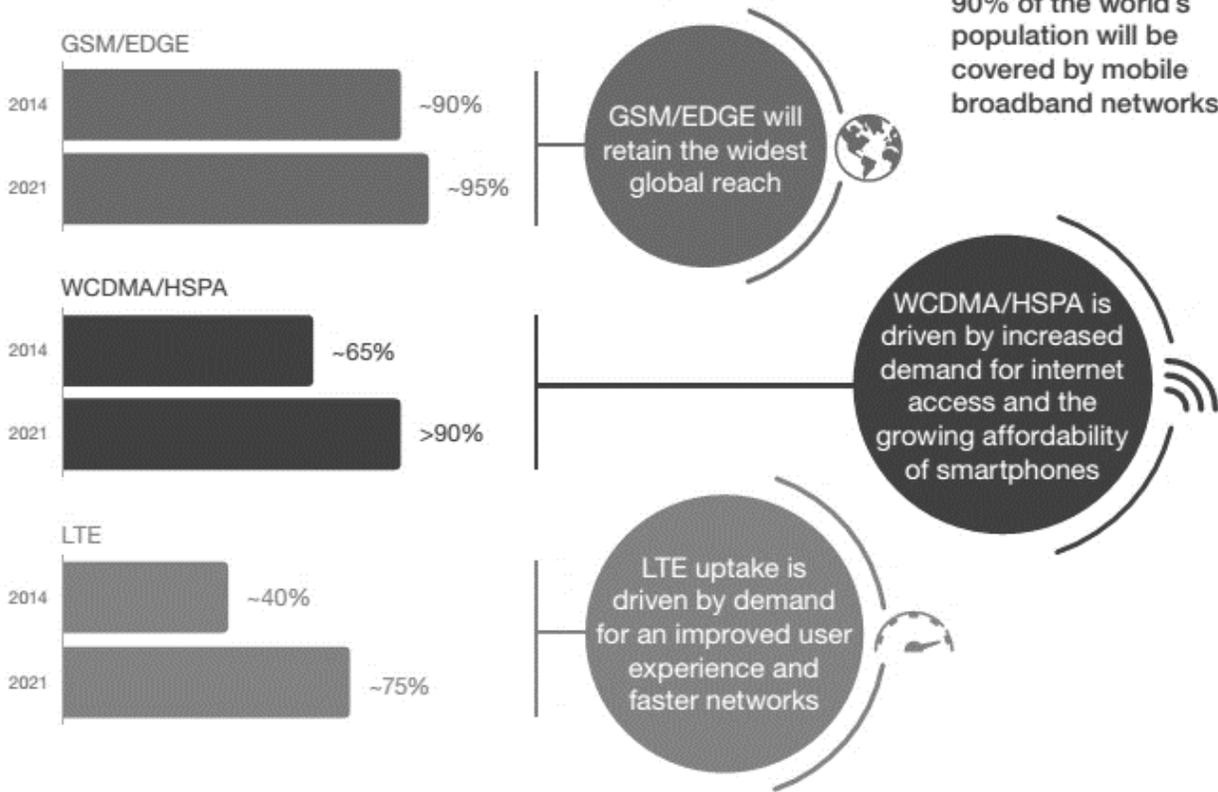


Anexo IX. Arquitectura de alto nivel de los sistemas 3GPP. Tomado de [2].

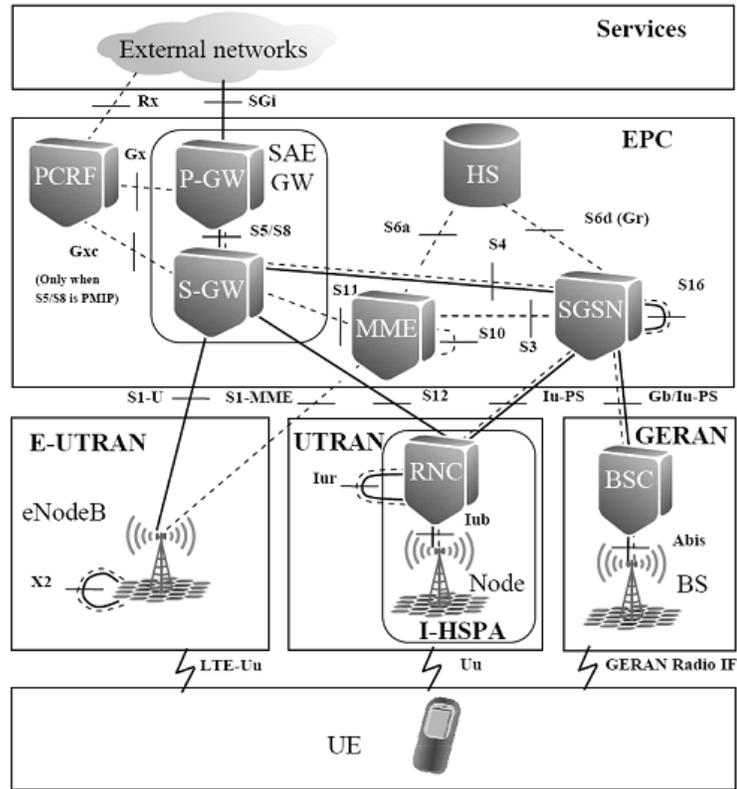


Anexo X. Cobertura por tecnología. Tomado de [9].

World population coverage by technology¹



Anexo XI. Arquitectura de acceso 3GPP.



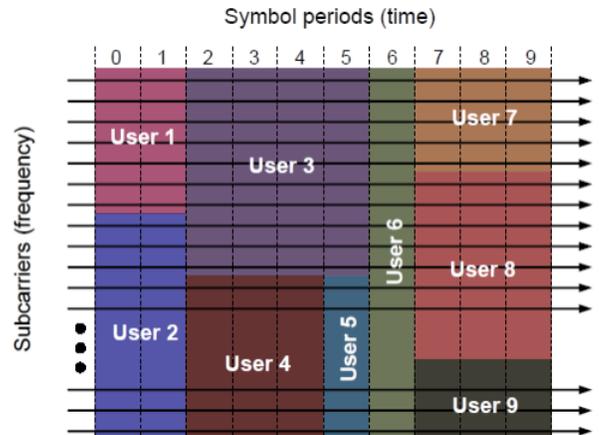
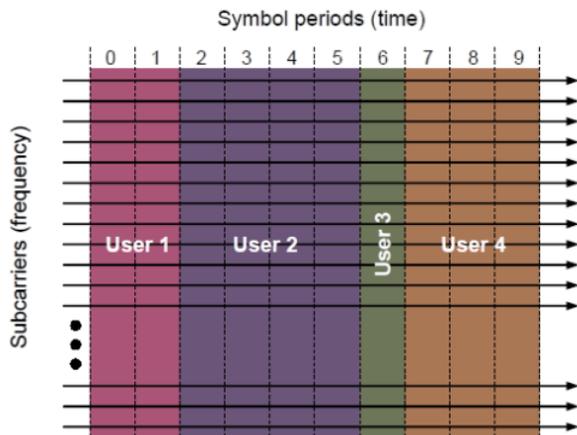
Anexo XII. Ventajas de OFDMA. Tomado de [51].

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

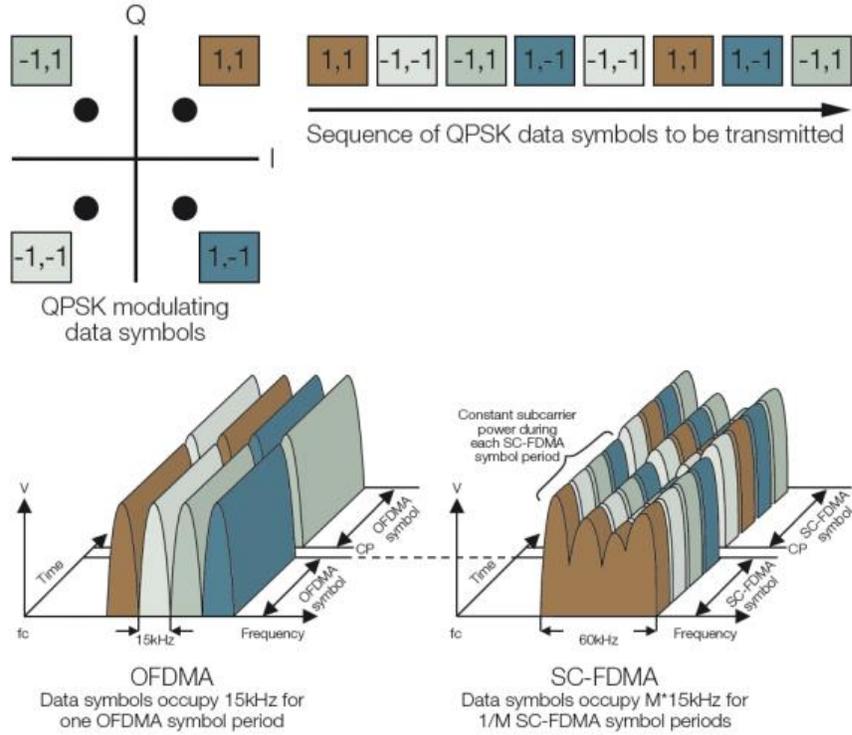
- OFDM allocates users in **time domain only**
- The entire channel bandwidth is allocated to one user

OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access

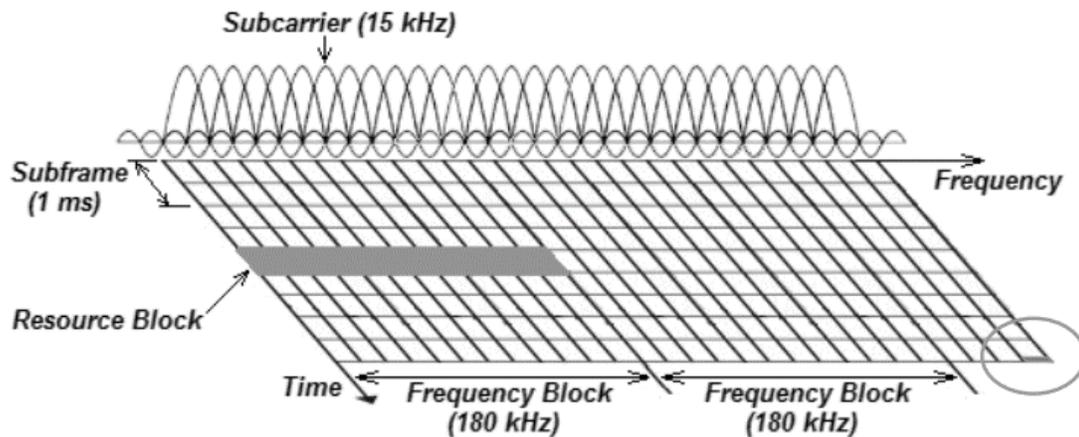
- OFDMA allocates users in **time and frequency domains**
- Several users served at once



Anexo XIII. Técnicas de acceso múltiple. Tomado de [51].



Anexo XIV. Interfaz de radio LTE. Tomado de [51].



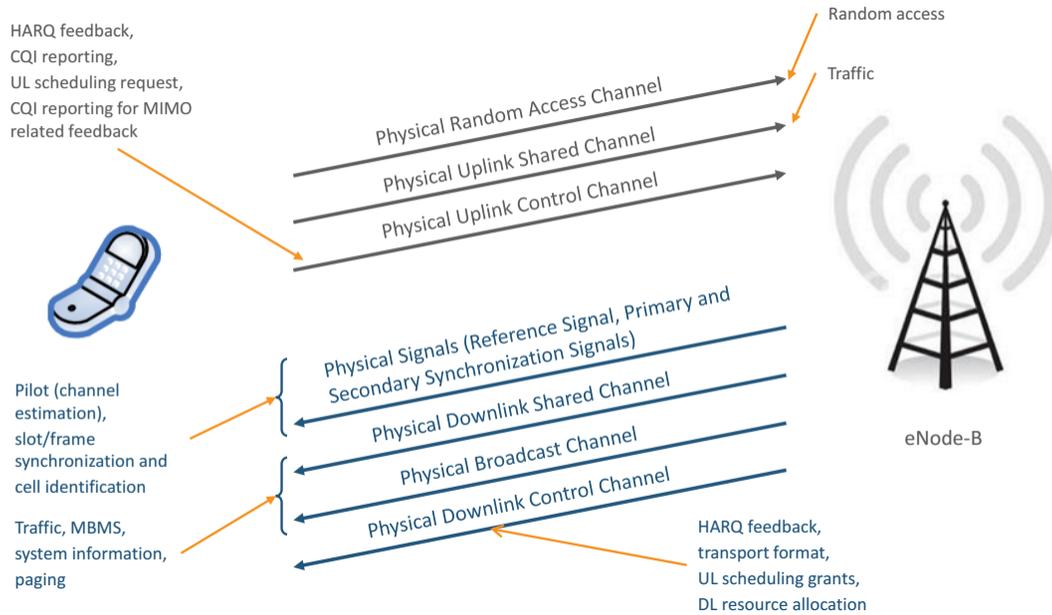
Estructura de canal LTE

- 1 canal está compuesto por más de un bloque de frecuencias (frequency block, FB).
- El ancho del FB es fijo = 180 KHz.
- 1 bloque de frecuencias sobre un slot = 1 bloque de recursos (resource block, RB).
- Cada FB está compuesto por muchas subportadoras.
- El ancho de una subportadoras es de 15 KHz.
- 1 FB = 12 subportadoras de 15 KHz.
- 1 subportadora sobre una duración de símbolo = 1 RB

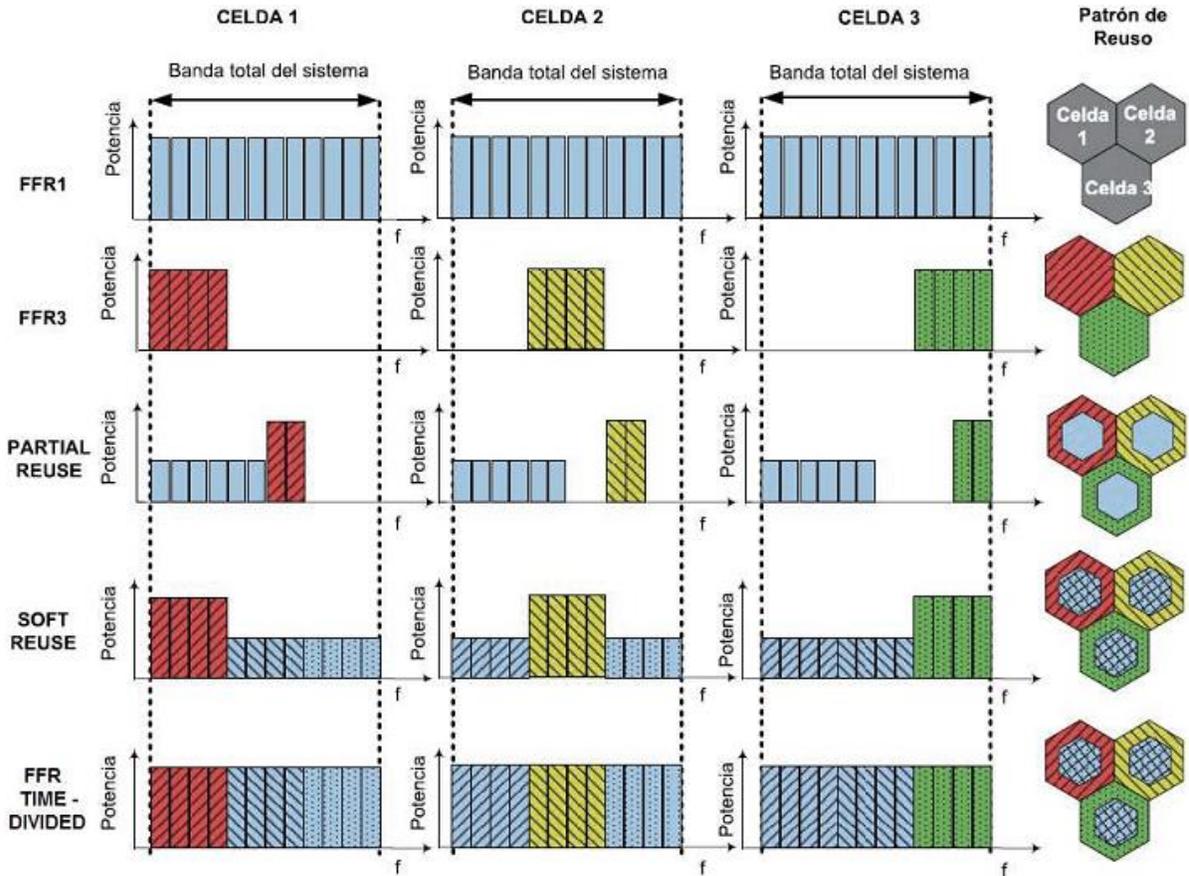
Estructura en el dominio del tiempo para el enlace de subida y enlace de bajada

- La estructura de trama es para TDD y FDD.
- 1 trama = 10 ms = 2 mitad de trama TDD = 10 subtramas o TTI cada 1 ms = 20 slot cada 0.5 ms.
- 1 slot de 0.5 ms = 6 o 7 símbolos de duración dependiendo del tamaño del prefijo cíclico.
- 1 FB sobre 1 subtrama de 1 ms = unidad más pequeña que es asignada por el planificador.
- El canal de control es transmitido en la subtrama 0 y 5 siempre en el enlace de bajada.

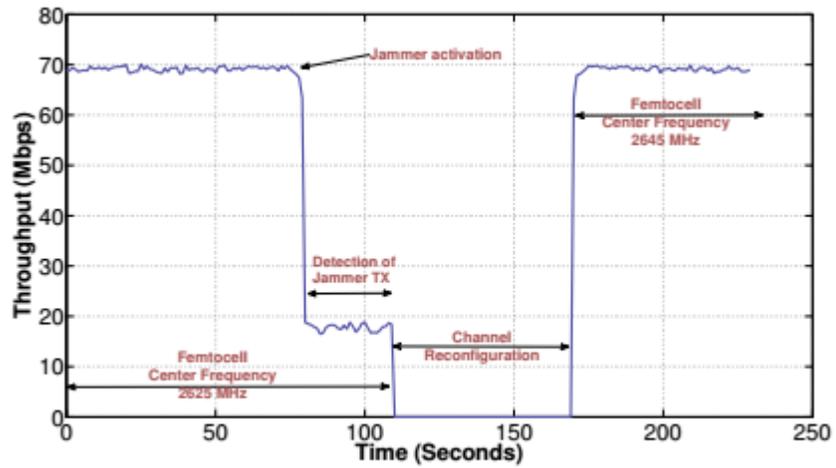
Anexo XV. Canales físicos. Tomado de [51].



Anexo XVI. Esquema de reúso de frecuencias. Tomado de [52].



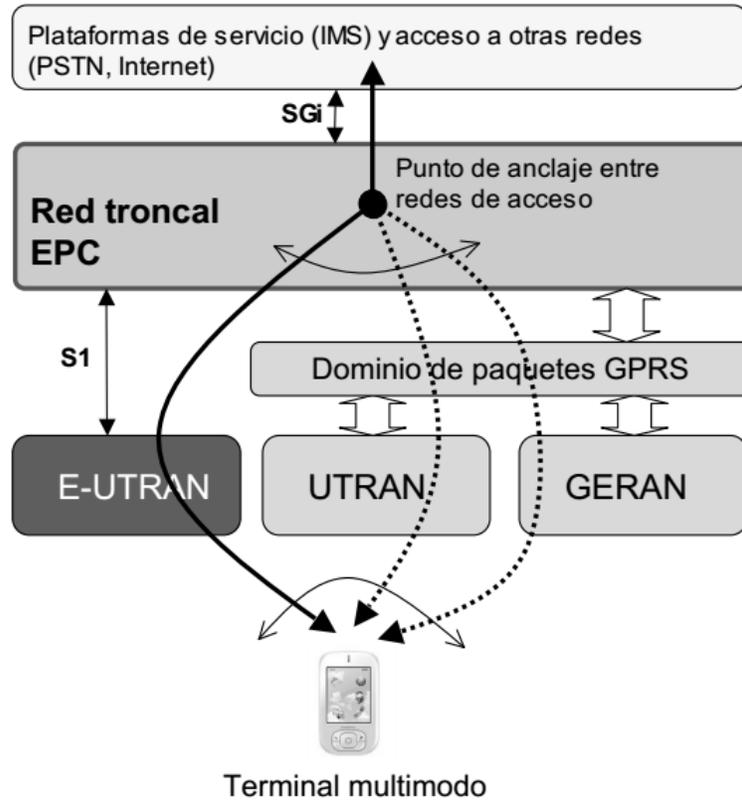
Anexo XVII. Variación del throughput y reconfiguración del canal. Tomado de [31].



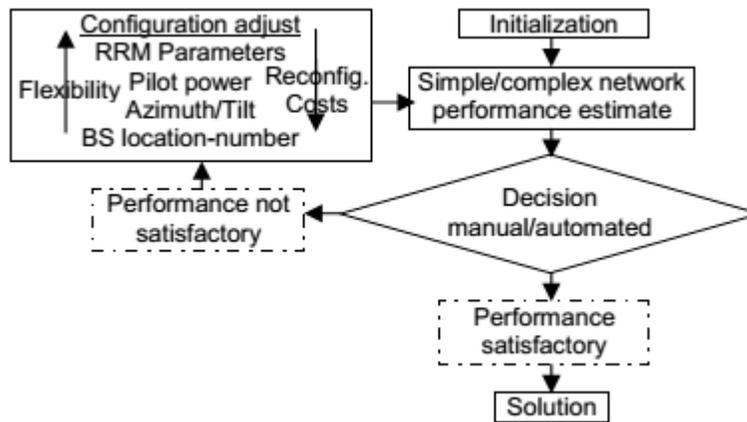
Anexo XVIII. Ancho de banda soportado en la capa física LTE. Tomado de [51].

Channel bandwidth	Subcarrier spacing	Number of FBs	Number of subcarriers	Sampling frequency	FFT size
1.4 MHz		6	72	1.92 MHz (1/2 x 3.84)	128
3 MHz	15 kHz	15	180	3.84 MHz (1 x 3.84)	256
5 MHz		25	300	7.68 MHz (2 x 3.84)	512
10 MHz	(7.5 kHz for MBMS)	50	600	15.36 MHz (4 x 3.84)	1024
15 MHz		75	900	23.04 MHz (6 x 3.84)	1536
20 MHz		100	1200	30.72 MHz (8 x 3.84)	2048

Anexo XIX. Interoperatividad entre redes de acceso 3GPP. Tomado de [2].



Anexo XX. Planeamiento y Optimización de la Red. Tomado de [15].



Anexo XXI. Flujo de trabajo para el diseño de una red múltiple 3GPP. Tomado de [51]

