

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Análisis del impacto en la red LTE del despliegue de una red WTTx sobre su propia infraestructura.

Autor: Marco Antonio Artilles Rodríguez.

Tutores: Ing. Alejandro Rodríguez Quintero.

MSc. Rafael Alejandro Olivera Solís.

Consultantes: MSc. Roberto Vázquez Sánchez.

PENSAMIENTO

Es más fácil viajar en un avión, incluso pilotarlo, que entender por qué puede volar.

John Von Neumann.

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mi madre por todo el amor y el cariño que me ha brindado, a mis amigos y a todos los que ayudaron a la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primero que todo, a mi familia, especialmente a mi madre, por el amor que me han brindado siempre.

Mi hermana por darme su cariño de manera muy extraña, pero de corazón.

Para mis amigos, tanto los de Camagüey como los que he hecho en la universidad, a Andy Ernesto García Casas por incluso en la distancia ser el mejor amigo que he podido tener sin pedirlo, al Wayne Junior por ayudarme, prestarme la corriente de su casa y apoyarme en la realización de este trabajo.

A mi novia, que ha luchado conmigo, me ha ayudado, me ha levantado en las malas y sobre todo en las peores, a sus familiares que también me apoyaron mucho para llegar hasta aquí.

A Laura Rosa y a Ernesti por siempre estar conmigo, hacerme reír y alejarme un poco de los problemas.

A todos mis compañeros de estudio en los diferentes cursos por los que pasé, a la gente del 306 A (Andy el titi, El calvo picante, Julitin prieto moderno, Al Cesar el abusador, La princesa grumosa) y las muchachas del 201 A por ser la familia que tanto necesitaba en la universidad

Agradezco al claustro de profesores de la carrera que me permitieron esforzarme para llegar y seguir adelante. A mis tutores Ing. Alejandro Rodríguez Quintero y MSc. Rafael A. Olivera Solís y además al MSc. Roberto Vázquez Sánchez.

RESUMEN

El correcto planeamiento de una red es fundamental para el establecimiento de nuevas tecnologías, debido a que este proporciona una mejora en el funcionamiento de la misma. Permite una mejor cobertura y además un servicio de mayor calidad para los usuarios de esta. Además del planeamiento hay que tener en cuenta la optimización de la red debido a que esta es de gran importancia por todos los beneficios que trae consigo, este es un trabajo diario y continuo el cual es necesario para satisfacer ciertos estándares conocidos como indicadores de clave de rendimiento. Gracias al planeamiento automático de redes LTE y a las características de esta tecnología, actualmente se han podido implementar tecnologías de gran ancho de banda como es WTTx la cual se apoya en la red móvil con infraestructura LTE para entregar a un CPE privado conexión de alta calidad y alta fidelidad con tiempos de retardo mínimo y baja latencia.

La presente investigación establece como objetivo analizar los parámetros fundamentales de la red LTE de la ciudad de Camagüey, antes y después del establecimiento de la tecnología WTTx para su utilización en el servicio de Nauta Hogar. Para la coexistencia de ambas tecnologías se modificaría el actual MIMO 4x4 a MIMO 2x2. Está previsto que tenga como base la misma infraestructura de red actual LTE. El estudio se llevará a cabo utilizando software moderno de planeamiento de redes.

ABSTRACT

The correct planning of a network is essential for the establishment of new technologies, because it provides an improvement in the operation of the network, allows better coverage and also a higher quality service for its users. In addition to planning, network optimization must be taken into account because it is of great importance for all the benefits it brings, this is a daily and continuous work which is necessary to meet certain standards known as key performance indicators. Thanks to the automatic planning of LTE networks and the characteristics of this technology, currently it has been possible to implement high bandwidth technologies such as WTTx which relies on the mobile network with LTE infrastructure to deliver to a private CPE high quality and high fidelity connection with minimum delay times and low latency.

The objective of this research is to analyze the fundamental parameters of the LTE network in the city of Camagüey, before and after the establishment of WTTx technology for its use in the Nauta Hogar service. For the coexistence of both technologies, the current 4x4 MIMO would be modified to 2x2 MIMO, all this is planned to be based on the same current network infrastructure. The study will be carried out using modern network planning software.

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|---|--------------------------------------|
| PENSAMIENTO | i |
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| RESUMEN | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| Organización del informe | 12 |
| CAPÍTULO 1. Caracterización de las tecnologías de redes móviles..... | 14 |
| 1.1. Tecnologías móviles actuales. Generalidades..... | 14 |
| 1.2. Tecnologías de primera generación | 14 |
| 1.3. Tecnologías de segunda generación..... | 13 |
| 1.3.1. Acceso múltipe por division de tiempo (TDMA)..... | 15 |
| 1.3.2. Sistema Global para comunicaciones móviles (GSM) | 15 |
| 1.3.3. Servicio General de paquetes via radio (GPRS)..... | 14 |
| 1.3.4. Datos mejorados para la evolucion de GSM (EDGE) | 15 |
| 1.4. Tecnologías de tercera generación..... | 17 |
| 1.4.1. Sistema Universal de Telecomunicacion Móviles (UMTS) | 17 |
| ➤ Tecnología WCDMA | ¡Error! Marcador no definido. |
| ➤ Tecnología TD-CDMA | 21 |
| ➤ Tecnología HSPA | 21 |
| ➤ Tecnología HSPA+..... | 22 |
| 1.5. Tecnologías de cuarta generación..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.1. Tecnologías LTE..... | 22 |
| ➤ Tecnología MIMO..... | 25 |
| ➤ Tecnología OFDM..... | 27 |
| 1.5.2. Tecnologías para ofrecer los servicios de voz y mensajería en LTE..... | 25 |
| ➤ Tecnologías VoLTE/VoLGA | 26 |
| ➤ Tecnología SRVCC | 27 |
| ➤ Tecnología CSFB | 29 |
| 1.5.3 Tecnologías LTE Advanced | 30 |
| 1.6 WTTx..... | 32 |
| CAPÍTULO 2. Planeamiento de redes LTE..... | 35 |
| 2.1 Planeamiento de redes LTE | 35 |
| 2.1.1 Planeamiento automatico de redes LTE | 38 |
| 2.1.2 Optimizacion de redes LTE..... | 41 |
| 2.1.3 Indicador clave de rendimiento (KPI) | 42 |
| 2.2 Herramientas | 43 |
| 2.2.1 Atoll | 45 |
| 2.2.2 NetMonitor..... | 46 |
| 2.2.3 NetMonster | 48 |
| CAPÍTULO 3. Evaluación de la solución propuesta. | 50 |
| 3.1 Descripción del caso de estudio | 50 |
| 3.2 Características de los equipos | 51 |
| 3.3 Evaluación de la solución propuesta con el Atoll | 51 |
| 3.4 Evaluación de los resultados. | 61 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 62 |

| | |
|--|----|
| Conclusiones | 63 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |
| ANEXOS | 68 |
| Anexo 1: Diferencias entre las diferentes tecnologías para brindar servicio de voz en LTE | 68 |
| Anexo 2: Beneficios de MIMO | 68 |
| Anexo 3: Características de las diferentes redes celulares | 69 |
| Anexo 4: Evolución de las generaciones de la telefonía móvil | 69 |

INTRODUCCIÓN

Durante toda su existencia, la especie humana ha sentido la necesidad de comunicarse, de compartir información ya sea a cortas distancias o hasta la parte opuesta del globo. Todo esto ha propiciado la creación primero de métodos de comunicación y luego de tecnologías modernas que le permitan llevar a cabo su cometido.

Con el desarrollo de las tecnologías móviles y el surgimiento de las redes de datos móviles a partir de su segunda generación, se hacía cada vez más grande la necesidad de transmitir datos de información. Debido a esto fueron evolucionando y surgiendo nuevas técnicas y nuevas generaciones de redes móviles creándose la 3G, la 4G (LTE) hasta llegar hasta la actualidad con la reciente red de datos 5G.

Este trabajo se centra en las tecnologías de cuarta generación (4G). LTE fue creada con el objetivo de superar con creces las velocidades existentes en las tecnologías de tercera generación. Esta ofrece velocidades de transmisión de datos alta y es compatible con tecnologías ya desplegadas antes, lo q posibilito a los operadores de redes móviles, desplegar esta tecnología sin afectar los servicios básicos de telefonía y mensajería.

Nauta Hogar es un proyecto tecnológico desarrollado y administrado por ETECSA que tiene como objetivo la comercialización de servicios de Internet a personas naturales cubanas a través de conexión ADSL. El proyecto comenzó en 2016. Desde el 19 de diciembre de ese año y hasta el 28 de febrero de 2017 se realizó una prueba piloto en 858 casas de dos consejos populares del centro histórico de La Habana, donde los usuarios tuvieron acceso gratis a Internet desde sus hogares. Tras esta prueba gratuita comenzó el proceso de comercialización del servicio con varias tarifas.[1]

Debido a la creciente necesidad de expansión de redes y a la necesidad de mejorar las conexiones, agregando también que no se puede llegar a todas las casas del país utilizando la tecnología ADSL debido a problemas en las líneas y a poca disponibilidad de servicios telefónicos previamente instalados para la implementación de esta tecnología. La Empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA), se ha planteado hacer un despliegue de una red WTTx sobre LTE con vistas a proporcionar servicios de FWA de forma inalámbrica a los hogares dando un servicio similar y hasta mejor según la velocidad que se defina comercialmente. El servicio de acceso inalámbrico será por medio de *routers* 4G fijos. Para el despliegue de esta red WTTx será necesario realizar un planeamiento aprovechando la infraestructura LTE actual.

En Cuba se usa GSM 900 desde de mayo del 2001 en la banda de 900 MHZ, aunque en algunos lugares hay disponibilidad de la GSM 850.

En el año 2014 comienzas los primeros despliegues de la red 3G en Cuba, en la banda de 900 MHZ y en marzo de ese mismo año se ofrece el servicio de correo nauta utilizando la tecnología 3G. Sin embargo, no se pudo acceder a internet utilizando esta red hasta el año 2017 donde se abrió esta para algunos usuarios.

Desde tiempo tempranos en el año 2018 comenzaron las pruebas de tecnología de cuarta generación LTE (4G) y el 6 de diciembre de ese mismo año se abre el servicio de internet para todos los usuarios de la red utilizando la tecnología 3G. Durante el segundo semestre del año 2019 se implementó la red 4G ya desplegada. Con el pasar de los años se ha ido incrementando la cantidad de lugares que disfrutan de esta tecnología, se agregó a sus servicios la tecnología LTE-Advanced con *Carrier Aggregation*. Así mismo ha crecido paulatinamente la cantidad de usuarios que utilizan el nauta hogar y se han disminuido los precios de sus servicios, así como también se ha reducido el costo de los paquetes de navegación por telefonía móvil. Ya en este año se encuentra desplegada una red WTTx en Matanzas, Varadero y La Habana, que aún no ha entrado en servicio, pero ya está montada y probada. Por tanto, se trabaja en extender ese servicio al resto del país y es lo que da lugar a la realización de este trabajo para la provincia de Camagüey, para que cuando llegue esta tecnología, exista un estudio del impacto que tendrá su implementación en la infraestructura actual de red LTE y los servicios que brinda.

La modernización de las redes móviles en Cuba ha experimentado un gran avance en los últimos dos años, en estos momentos no solo se cuenta con una red de tercera generación de alcance nacional para el soporte de internet por datos móviles, sino que hay presencia de una red de cuarta generación que alcanza todas las cabeceras municipales del país e incluso LTE-A en todas las ciudades. Concurren tres tecnologías de acceso, las cuales presentan relaciones para el traspaso de la comunicación entre ellas, además de que la red LTE usa el método de traspaso a conmutación de circuitos de llamadas de voz (CSFB), para que toda la red funcione de forma armónica.

Por otra parte, la implementación de Nauta Hogar fue uno de los sucesos tecnológicos más seguidos en Cuba. La llegada de Internet a las casas de los cubanos constituyó una de las noticias más seguidas del año en la Isla, ya que en 2017 aún no existía la posibilidad de contratar la navegación por datos celulares. Es un servicio autenticado de acceso a la navegación mediante nombre de usuario y contraseña. Para darle solución a las limitaciones de este servicio se cuenta con una red LTE con MIMO 4x4 en la banda de 1800MHz y se piensa implementar la red WTTx en la banda de 2100MHz con otros radios, pero usando las mismas antenas lo cual obliga a comenzar a utilizar MIMO 2x2 tanto en la red LTE como en la red WTTx para poder aprovechar la misma infraestructura existente que sí da cobertura en ambas bandas, lo cual lleva al autor de este trabajo a la formulación de la siguiente interrogante científica.

¿Cómo impacta en el desempeño de la red LTE, el despliegue de una red WTTx sobre su propia infraestructura?

En concordancia con lo expuesto anteriormente se plantea el siguiente **objetivo general**:

- Analizar el impacto sobre la red LTE de la ciudad de Camagüey que conlleva el despliegue de una red WTTx, garantizando los indicadores de desempeño actuales.

Para el logro del mismo se plantean como objetivos específicos:

1. Establecer los referentes teóricos sobre las redes Móviles, LTE en particular.
2. Caracterizar los elementos que permiten el despliegue de la tecnología WTTx sobre la infraestructura actual de red LTE.
3. Evaluar el desempeño de la red LTE tras el despliegue de la WTTx mediante una herramienta de simulación.

Para validar la importancia de este proyecto se formulan las siguientes interrogantes científicas:

- ¿Cuáles son los referentes teóricos de las redes móviles LTE?
- ¿Cómo minimizar el impacto sobre la red LTE tras la implementación de la red WTTx, en un escenario real?
- ¿Se logra un buen desempeño de la red LTE con las modificaciones propuestas?

El informe se organiza de la siguiente manera:

Introducción, donde se define la importancia, actualidad, estructura y funcionalidad de las redes móviles, haciendo énfasis en las redes LTE y se dejarán explícitos los elementos teóricos. En el primer capítulo se describen las tecnologías de redes móviles, sus características, su arquitectura y se hace además una profundización en la tecnología WTTx. En el capítulo dos, se describe el planeamiento de redes LTE, así como el planeamiento automático, los tipos de planeamiento, los KPI y además se describe la herramienta Atoll. En el tercer y último capítulo se realiza la simulación, de un *cluster* con tecnología MIMO 4x4, luego se compara con los resultados de una nueva simulación la cual utilizara MIMO 2x2, y se hace una evaluación del desempeño de la tecnología de red LTE viendo los parámetros de área de servicio efectiva, el *Throughput* y también la cobertura por intensidad de la señal. En las conclusiones se darán algunos resultados a partir de los objetivos propuestos. Luego en las recomendaciones indicando la necesidad del enriquecimiento científico y/o estudios futuros que puedan ser derivados del trabajo realizado. Bibliografía, cumpliendo con el rigor requerido seguido de los Anexos que complementarán los resultados del análisis e investigación realizado.

CAPÍTULO 1. Caracterización de las tecnologías de redes móviles

1.1. Tecnologías móviles actuales. Generalidades.

El objetivo de este capítulo es hacer una caracterización genérica y breve de las distintas tecnologías de redes móviles que existen o existieron en el país. Haciendo énfasis en las estructuras fundamentales y las definiciones específicas de cada tecnología. La descripción se realiza agrupando las tecnologías por generaciones.

1.2. Tecnologías de primera generación

A principios de los años 80 se desplegaron los sistemas de telefonía celular analógica. En ese momento cada país desarrolló su propio sistema, limitando el uso dentro de las fronteras nacionales y evitando economías de escala. En la mayoría de los países estos sistemas fueron reemplazados por sistemas 2G durante la década del 90 [2].

No fue hasta 1980 cuando el fabricante Ericsson lanzó el sistema NMT (*Nordic Mobile Telephony*) 450 MHz que usaba canales de radio analógicos y modulación tipo FM. Poco después modernizaron el sistema hasta el NMT 900 que prestaba el mismo servicio que el anterior, pero a una frecuencia mayor, lo que derivaba en mayor capacidad en número de usuarios y mejora en la portabilidad de los terminales. Entonces, 1G fue la generación de comunicación, aún analógica, con la que los usuarios podían establecer comunicación por voz, pero alcanzando frecuencias del orden de 900 MHz. Uno de sus estándares conocido fue AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) [3].

1.3. Tecnologías de segunda generación

Basado en la transmisión digital, las redes celulares 2G se introdujeron a finales de la década de 1980. Existen varias ventajas del sistema digital sobre el analógico. Estados Unidos y Europa tenían diferentes enfoques hacia el desarrollo de 2G. La red celular de segunda generación fue lanzada comercialmente en el estándar GSM (*Global System for Mobile Communications*) en 1991 [4].

Las limitaciones del sistema de telefonía móvil de primera generación llevaron al desarrollo de un nuevo sistema (segunda generación). Este sistema se basó en introducir protocolos de telefonía digital que además de permitir más enlaces simultáneos en un mismo ancho de banda, permitía integrar otros servicios en la misma señal. Aquí se agrupan las tecnologías PDC (*Personal Digital Cellular*), TDMA (*Time Division Multiple Access*), GSM, GPRS (*General Packet Radio Service*), EDGE (*Enhanced Data rates GSM Evolution*), CDMAOne (*Code Division Multiple Access One*) y CDMA2000 (*Code Division Multiple Access 2000*) [5].

1.3.1. Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA):

La tecnología TDMA y en particular TDMA-136 es la Segunda Generación de sistemas móviles que se le ha denominado D-AMPS (*Digital Advanced Mobile Phone System*). Esta constituye un avance digital del sistema analógico AMPS con existencia en América. En 136⁺ la combinación de operación de múltiples ranuras y el nuevo esquema de modulación, modulación por desplazamiento de 8 fases (PSK) basado en el ancho de banda de la portadora de 30 kHz permite velocidades de datos aproximadamente cuatro veces mayor [6].

1.3.2. Sistema Global para comunicaciones móviles (GSM):

La evolución de GSM ha estado marcada por tres fases de evolución, la fase 1, en la que se produjeron sus especificaciones; la fase 2, en la que se propuso la inclusión de servicios de datos y de fax; y finalmente, la fase 2⁺, en la que se realizan mejoras sobre la codificación de voz y se implementan servicios de transmisión de datos avanzados, entre ellos GPRS y EDGE. GSM es un sistema de conmutación de circuitos, diseñado originalmente para voz, al que posteriormente se le adicionaron algunos servicios de datos: servicio de mensajes cortos, un servicio de entrega de mensajes de texto de hasta 160 caracteres y un servicio de datos GSM, que permite una tasa de transferencia de 9.6 kbps [7].

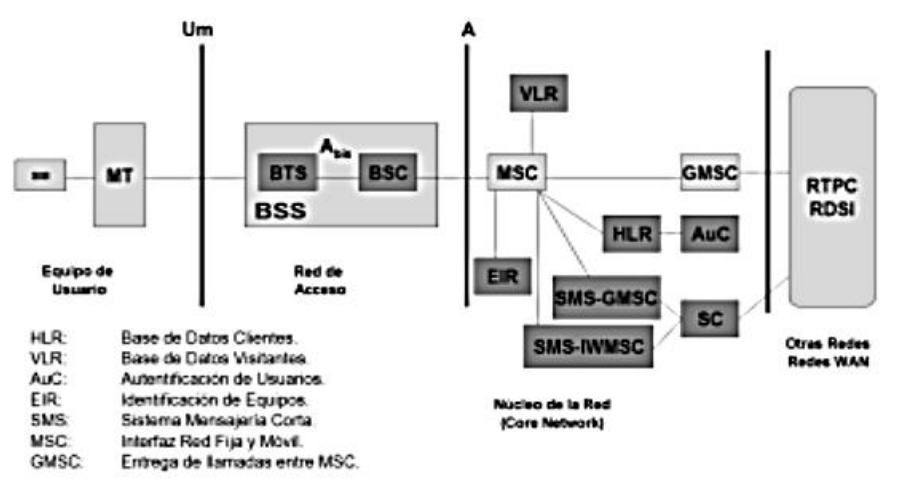


Figura 1.1 Arquitectura de red GSM [7].

1.3.3. Servicio General de paquetes vía radio (GPRS):

La arquitectura de red de GPRS consta de una red de superposición en la red GSM. Se reutiliza la mayoría de los elementos de la red GSM con algunos nuevos elementos de red (nodos) que se agregan para proporcionar servicios de conmutación de paquetes. Estos nuevos nodos de red, llamados Nodos de soporte GPRS (GSN), son responsables del enrutamiento y la entrega de los paquetes de datos hacia y desde la estación móvil (MS) y redes externas de paquetes de datos (PDN). Los servicios GSN (SGSN) reenvían las IP entrantes y salientes de los paquetes provenientes de una MS adjunta al área de servicio de SGSN. Sirve para todos los Suscriptores GPRS que se encuentran físicamente dentro del área geográfica de servicio SGSN. Por otro lado, el Gateway GSN (GGSN) actúa como una interfaz entre la red troncal GPRS y PDN externos, como el Internet pública o redes privadas. Los SGSN y los GGSN son conectado a través de la red troncal GPRS que utiliza el protocolo de tunelización GPRS (GTP) [4]. GTP permite paquetes multiprotocolo para ser tunelizados a través del GPRS red troncal [8].

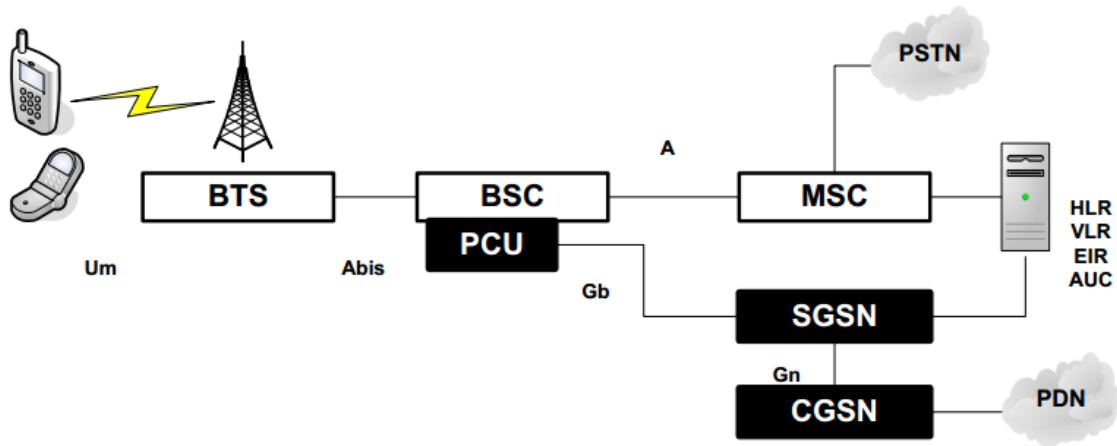


Figura 1.2 Arquitectura GPRS [8].

1.3.4. Datos mejorados para la evolución de GSM (EDGE)

Las redes GPRS son capaces de manejar tasas de bits más altas que las redes GSM, pero las tasas de datos aún no alcanzan lo que se requería para que las redes GSM existentes entregaran servicios a una velocidad comparable a la prometida por las redes de tercera generación. El retraso en el despliegue de los sistemas de tercera generación provocó el surgimiento de una tecnología conocida como EDGE. Esto fue capaz de brindar servicios similares a los de las redes de tercera generación, pero con implementación en las redes de segunda generación existentes [9].

La tecnología EDGE es una versión extendida de GSM. Permite la transmisión clara y rápida de datos e información. También se denomina como IMT-SC o single transportador. La tecnología EDGE fue inventada e introducida por *Cingular*, que ahora se conoce como AT&T. EDGE es tecnología de radio y es parte de tecnologías de tercera generación. La tecnología EDGE es preferido sobre GSM debido a su flexibilidad para transportar datos de conmutación de paquetes y datos de conmutación de circuitos [10].

La interfaz de aire EDGE está diseñada para facilitar una razón de transmisión de bit más alta que las actualmente alcanzables en los sistemas celulares existentes. Para aumentar la tasa de bits bruta, 8 PSK, se introduce la modulación de alto nivel. Se selecciona 8-PSK porque proporciona altas velocidades de datos, alto espectro, eficiencia y complejidad de implementación moderada. La modulación GMSK, tal como se define en GSM, también forma parte del concepto de sistema EDGE. La tasa de símbolos es de 271 kb/s para ambas

modulaciones, lo que lleva a velocidades binarias brutas por intervalo de tiempo de 22,8 kb/s y 69,2 kb/s para GMSK y 8-PSK, respectivamente [11].

1.4. Tecnologías de tercera generación.

3G fue lanzada en Japón en octubre de 2001 por NTT DoCoMo. Los factores esenciales de esta tecnología eran fusionar los principios de tecnologías inalámbricas como el Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), Sistema global de comunicación Móvil (GSM) y CDMA [12].

Los protocolos de telefonía móvil de tercera generación admiten velocidades de datos más altas, destinados a aplicaciones distintas que se centran en la voz. El cambio de 2G a 3G no solo ofreció a los usuarios nuevas formas de comunicarse, sino también una variedad de nuevos servicios como navegar por Internet, correo electrónico, mensajería instantánea, videoconferencia y televisión digital. 3G también hace orientación, presencia y servicios basados en la ubicación disponibles para los usuarios móviles. Las principales características de 3G son proporcionar servicios multimedia móviles a una tasa de transmisión de 144 kbps a alta velocidad, 384 kbps a velocidad de caminar y 2 Mbps en interiores. Este máximo teórico (2Mbps) se acerca a la velocidad de las conexiones LAN que tienen muchos hogares hoy en día. Además, las redes 3G pueden ofrecer una transmisión de datos más rápida que la conexión LAN más lenta (256 kbps) y GPRS que generalmente ofrece una velocidad de transferencia de 40 kbps a 55 kbps [13].

En la tercera generación se agrupan distintas tecnologías, entre ellas se encuentran, la tecnología UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), la cual se basa en la tecnología WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) con las mejoras de HSPA (*High Speed Packet Access*) y HSPA⁺ (*High Speed Packet Access Evolved*) y en las variantes de acceso TD-SCDMA (*Time División Synchronous Code Division Multiple Access*) y TD-CDMA (*Time División Code Division Multiple Access*).

1.4.1. Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS):

La red de acceso de radio en UMTS se basa en DS-CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Access*), donde los enlaces en el sistema comparten el mismo espectro de frecuencia y se les asignan códigos para permitir a los receptores recuperar las señales deseadas [14].

Las tres etapas que estructuran la red UMTS son UE (Equipo de usuario), la red de acceso a radio o UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y la red troncal de conmutación o CN (*Core Network*) enlazados cada uno de ellos con su respectiva interfaz de conexión.

- **User equipment (UE):** El equipo de usuario es el dispositivo que hace posible la comunicación constante entre un nodo y el usuario siempre y cuando haya cobertura conservando siempre el esquema de utilización de la tarjeta SIM. Estos equipos están diseñados para funcionar tanto en redes UMTS como GSM.
- **Utran:** La Red de acceso a radio está compuesta por varios elementos entre los cuales están RNC (*Radio Network Controller*) y el nodo B y juntos conforman lo que se llama RNS (*Radio Network Subsystem*). La función principal del nodo B es proporcionar cobertura a una celda en específico en el momento que el usuario lo desee. El RNC se encarga de asignar frecuencias, gestionar códigos y controlar niveles de potencia de radiofrecuencia. Esta etapa de la red es la encargada de establecer conexión con las estaciones móviles y el resto de la red. El sistema de la UTRAN de UMTS es muy similar al sistema de la BSS de la GSM.
- **Core Network:** El núcleo de red es el encargado incorporar las funciones de conmutación y transmisión necesaria para poder establecer comunicación con el abonado deseado el cual puede o no pertenecer a la red UMTS [15].

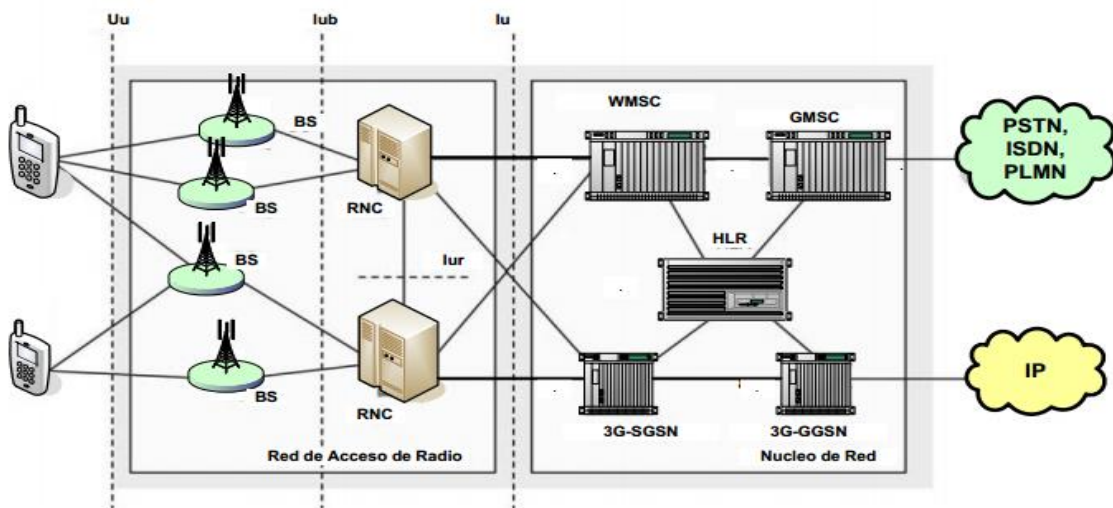


Figura 1.3: Arquitectura de red UMTS[15].

➤ **Tecnología WCDMA**

Acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA) fue inicialmente propuesto y diseñado con una visión que ya ha mostrado su futuro. WCDMA fue diseñado para ser un sistema de alto rendimiento capaz de soportar futuras aplicaciones que requieren transmisión simultánea de varios flujos de bits que requieren cualificación individual calidad de servicio (QoS). La elección de diseño original parece estar bien alineado con el futuro, donde todas las aplicaciones y los servicios se pueden transportar a través de redes IP que utilizan protocolos IP. Esta tendencia favorece nuevas aplicaciones donde los usuarios móviles tienen todas las sesiones en curso basadas en uno o varias aplicaciones. La tecnología WCDMA puede ser vista en tres fases diferentes, las cuales son descritas a continuación:

1. En la primera fase, la velocidad máxima de datos y el rendimiento del enlace descendente WCDMA para datos fue mejorado ampliamente. En marzo de 2000, debido a un estudio de viabilidad sobre alta velocidad se aprobó el acceso a paquetes de enlace descendente (HSDPA) por 3GPP [1]. El informe del estudio fue publicado como parte de la versión 4, y la fase de especificación de HSDPA se completó en la versión 5 al final de 2001. El estudio de viabilidad se centró en definir un canal compartido de enlace descendente de alta velocidad (HS-DSCH) que hereda muchas de las características del DSCH. Las principales mejoras técnicas propuestas para el HS-DSCH incluyen:
 - Codificación y modulación adaptativa (AMC).
 - Solicitud de repetición automática híbrida rápida (FHARQ).
 - Selección rápida de celdas.
2. En la segunda fase el énfasis principal de la optimización se puede ver en el área de soporte de alta velocidad de datos de enlace descendente. Mejor velocidad de datos en el enlace ascendente beneficia a la transmisión del usuario. Además, un enlace ascendente optimizado puede diseñarse para soportar el terminal inferior de salida de potencia. Además, en la fase 2 hay mejoras adicionales de HSDPA para FDD y TDD. Esto podría incluir las técnicas FCS y MIMO de rendimiento e implementación, factible y útil.
3. En la tercera fase algunos de las tecnologías de interfaz aérea previstas se vuelven antiguas en un marco de tiempo que puede ser inaceptable para las fases 1 y 2 propuestas por WCDMA. Es obvio, sin embargo, que más allá la mejora se introduce en fases posteriores. A medida que crece la demanda de velocidades de datos muy altas, es de

esperar la necesidad de mejorar aún más la tasas de datos WCDMA hasta significativamente por encima de 10 Mbps [16].

➤ **Tecnología TD-CDMA:**

TD-CDMA es el esquema de acceso de radio para el modo UTRA TDD. Se basa en un esquema TDMA que se amplía con un componente CDMA suplementario. En este sistema TD-CDMA, los códigos K-CDMA (usuarios) están activos simultáneamente en la misma frecuencia y en la misma franja horaria. Los diferentes códigos de dispersión permiten la separación de la señal en el receptor. De acuerdo con la velocidad de datos requerida, un usuario determinado puede usar varios Códigos CDMA y/o franjas horarias generales. La detección conjunta en un sistema TD-CDMA en el dominio del espacio-tiempo elimina la interferencia intracelular (interferencia de usuarios dentro de la misma celda). Además, se puede lograr una cancelación de la interferencia entre celdas teniendo en cuenta la matriz de covarianza espacio-temporal de la interferencia entre celdas más el ruido (IC-IN) [17].

➤ **Tecnología HSPA**

La tecnología HSPA se divide en dos vertientes y sus siglas son para referirse a estas, la primera es HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), la cual pertenece al enlace de bajada y la otra tecnología denominada HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) para el enlace de subida:

HSUPA mejora el rendimiento significativamente en comparación con WCDMA. HSDPA y HSUPA al unísono constituyen HSPA, lo que permite un rápido enlace celular a ambas direcciones. Además de tasas de bits más altas, HSPA también permite demoras más bajas que WCDMA. Esto permite un uso más amplio de aplicaciones en tiempo real como *Voice Over IP* (VoIP), videoconferencia y juegos en línea. Sus especificaciones vienen dadas por las versiones 5 y 6 del 3GPP respectivamente [18].

HSPA introduce varias técnicas como modulación de orden superior, programación rápida (dependiente del canal) y control de velocidad, y ARQ híbrido rápido con combinación suave. En conjunto, HSPA proporciona velocidades de datos de enlace descendente y enlace ascendente de hasta aproximadamente 14 y 5,7 Mbit/s, respectivamente, tiempos de ida y vuelta significativamente reducidos y capacidad mejorada [19].

➤ **Tecnología HSPA+**

El acceso de paquetes a alta velocidad evolucionado (HSPA⁺) es un estándar de banda ancha inalámbrico que se define como la versión 7 de 3GPP. Esta tecnología ofrece velocidades de hasta 42 Mbps en el enlace de bajada y 22 Mbps en el enlace ascendente, las cuales representan velocidades teóricas pico con tecnologías MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) utilizando modulación de orden superior como 64QAM. MIMO en sistemas basados en CDMA actúa como sectores virtuales para dar una mayor capacidad. La velocidad máxima real de un usuario está cerca de los 14 Mbps. HSPA⁺ también introduce una arquitectura opcional All-IP, para la red donde las estaciones base están directamente conectadas a nodos IP y luego a los routers de frontera que tienen conexión con los ISP's. Además ofrece mejoras en la vida útil de las baterías, una conexión rápida a la red después de un tiempo de inactividad, mayor soporte de servicios en tiempo real como voz sobre IP, juegos en línea y *push to talk* (PTT) para teléfonos o dispositivos móviles [20].

1.5. Tecnologías de cuarta generación.

1.5.1. Tecnologías LTE

Con el rápido desarrollo de la comunicación inalámbrica y aplicaciones multimedia como navegadores de Internet, juegos interactivos, TV móvil, transmisión de video y audio, la tecnología de comunicación móvil necesita cumplir con diferentes requisitos de datos móviles, cálculos móviles y operaciones multimedia móviles. Para acomodar el aumento en el uso de datos móviles y las nuevas aplicaciones multimedia, las tecnologías LTE (*Long Term Evolution*) y LTE-A (*Long Term Evolution Advanced*) han sido especificadas por el 3GPP como las tecnologías emergentes de comunicación móvil para la próxima generación de redes inalámbricas móviles de banda ancha. El sistema LTE está diseñado para ser un sistema basado en paquetes que contiene menos elementos de red, lo que mejora el sistema de capacidad y cobertura, proporciona un alto rendimiento en términos de altas velocidades de datos, baja latencia de acceso, ancho de banda flexible, operación e integración perfecta con otros dispositivos inalámbricos existentes en el sistema de comunicación. El sistema LTE-A mejora los sistemas LTE existentes para admitir un uso de datos mucho mayor, latencias más bajas y una mejor eficiencia espectral [21].

Dentro de las especificaciones de LTE se encuentran:

- LTE no es un estándar definido, se entiende como una nueva tecnología capaz de integrar lo mejor de GSM, GPRS, UMTS y HSPA incluso con una mejora de rendimiento.
- Presenta una baja latencia para una alta tasa de tráfico.
- La interfaz y la arquitectura de radio del sistema LTE completamente nueva, propone la prestación de servicios mediante la técnica de conmutación de paquetes IP, soportando además la movilidad de los mismos.
- LTE trabaja en un rango de bandas de frecuencias que comprenden entre los 800 MHz y 3.5 GHz y posee además diferentes anchos de bandas, regulados en los 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- El radio de la célula LTE alcanza los 5 Km y puede contener más de 200 usuarios para 5 MHz de ancho de banda y más de 400 para 20 MHz de ancho de banda [22].

Los elementos que conforman la arquitectura de la red LTE atendiendo a la figura 1.4 son:

- Equipos de Usuario (UE).
- Red de acceso evolucionada (E-UTRAN): se compone de una única entidad de red denominada *evolved Node B* (eNB) que constituye la estación base, por tanto, la estación base integra toda la funcionalidad de acceso, a diferencia de las redes GSM y UMTS. Esta está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2.
- Red troncal EPC (*Evolved Packet Core*): el eNB se conecta a esta red a través de la interfaz S1. La arquitectura EPC divide las funciones del *Gateway* de control en un plano de control comandado por el MME y un plano de usuario liderado por el SGW (*Serving Gateway*) lo que implica una arquitectura optimizada para el plano de usuario y una reducción en el número de elementos que son atravesados por los paquetes de datos.

Las principales entidades dentro del *core* son:

- MME: Obtiene datos de usuarios a través de la información almacenada en el HSS. Autentica, autoriza y selecciona la red de datos externa apropiada para establecer el enlace entre la E-UTRAN y las redes o servicios externos. MME proporciona

conectividad entre el eNodeB y la red UMTS existente a través del SGSN. También realiza tareas de movilidad y facturación.

- **SGW:** Es un equipo del plano de usuario que es controlado por el MME. También, es un punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio.
- **PGW (PDN Gateway):** Puede ser comparado con las funciones realizadas por el GGSN en 3G, pero tiene un papel importante en el control de la movilidad. El PGW asigna la dirección IP al UE.
- **HSS (Home Subscriber Server):** Almacena y administra datos relativos a la suscripción de usuarios.
- **PCRF (Policy Control and Charging Rules Function):** Realiza funciones de control de políticas y reglas de facturación [23].

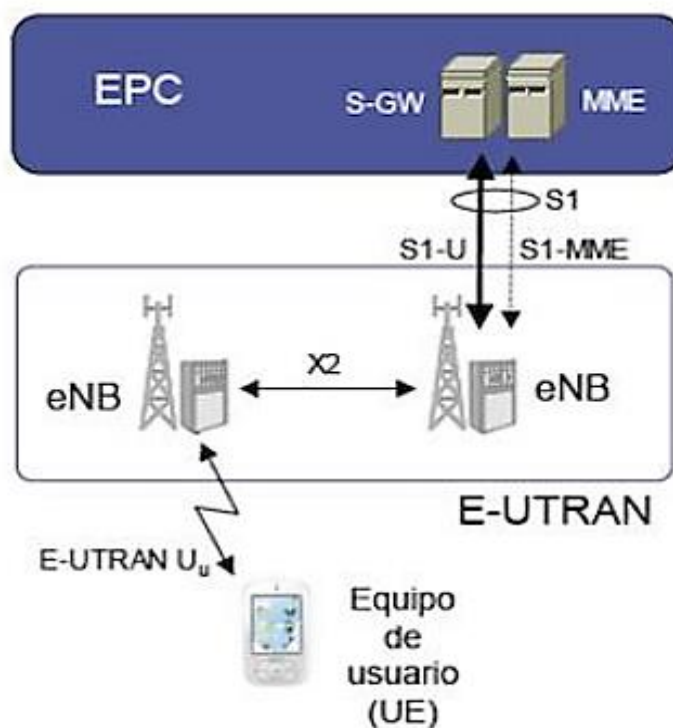


Figura 1.4 Estructura general de la arquitectura de red LTE [23].

➤ Tecnología MIMO

La tecnología MIMO involucra un número de elementos de antena de orden de magnitud superior que en las primeras versiones de los estándares. MIMO puede traer ganancias sin precedentes en términos de eficiencia espectral, energética y robustez para fallas y deterioros

del hardware. El uso de múltiples antenas introduce cierta complejidad al sistema para permitir diferenciar las señales recibidas. Por ello se pueden utilizar matrices de antenas 2x2, 4x2 o 4x4 [24].

Problemas como los desvanecimientos provocados por la propagación multitrayecto, pueden mitigarse a través de técnicas como MIMO, dando la oportunidad de mejorar significativamente la capacidad y el rendimiento de los sistemas. Mediante el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor los canales pueden ser explotados para crear múltiples enlaces sobre la misma banda. Las técnicas de múltiples antenas pueden ser usadas tanto en transmisión como en recepción. Dependiendo la configuración que se tenga los sistemas MIMO se dividen en: MISO (*Multiple-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*), SISO (*Single-Input Single-Output*) o simplemente como MIMO [25].

MIMO es básicamente la combinación de todas las técnicas de antenas múltiples como SISO, SIMO y MISO. SISO se refiere a un sistema de comunicación inalámbrico en el que se utiliza una antena en la fuente (transmisor) y una antena es utilizada en el destino. SISO no requiere procesamiento en términos de formas de diversidad que pueden utilizarse, pero es limitado en términos de rendimiento. La interferencia y desvanecimiento impactan sobre SISO más que sobre un sistema MIMO.

La versión SIMO de MIMO ocurre cuando el transmisor tiene una sola antena y el receptor tiene múltiples antenas. A menudo se utiliza para habilitar un sistema receptor que recibe la señal de un número de fuentes independientes para combatir el efecto del desvanecimiento. El receptor es entonces capaz de recibir la señal óptima que luego puede usar para extraer los datos requeridos (Ver figura 1.5).

MIMO ofrece varias ventajas sobre SISO, SIMO y MISO. La capacidad del sistema MIMO se incrementa sin aumentar la potencia transmitida y se logra una mejor cobertura de comunicación y calidad de transmisión. La capacidad adicional del canal se puede utilizar para mejorar la tasa de transmisión de información (Ver figura 1.6), así como la fiabilidad del sistema de comunicación aumentando la redundancia de información [26].

Las antenas de referencia MIMO 2x2 fueron concebidas durante la primera CTIA (*Cellular Telecommunications and Internet Association*) en la reunión del subgrupo MIMO OTA, e

inicialmente fueron diseñados para cubrir tres bandas LTE (2, 7 y 13). Conceptualmente para cada banda se colocaron tres antenas diseñadas para emular una "buena" figura de mérito del sistema MIMO (FoM), es decir, bajo coeficiente de correlación, alta eficiencia total de la antena y bajo desequilibrio de ganancia. Respectivamente, el sistema de antena MIMO "nominal" tiene un coeficiente de correlación moderado, eficiencia total de la antena moderada y bajo desequilibrio en la ganancia [27].

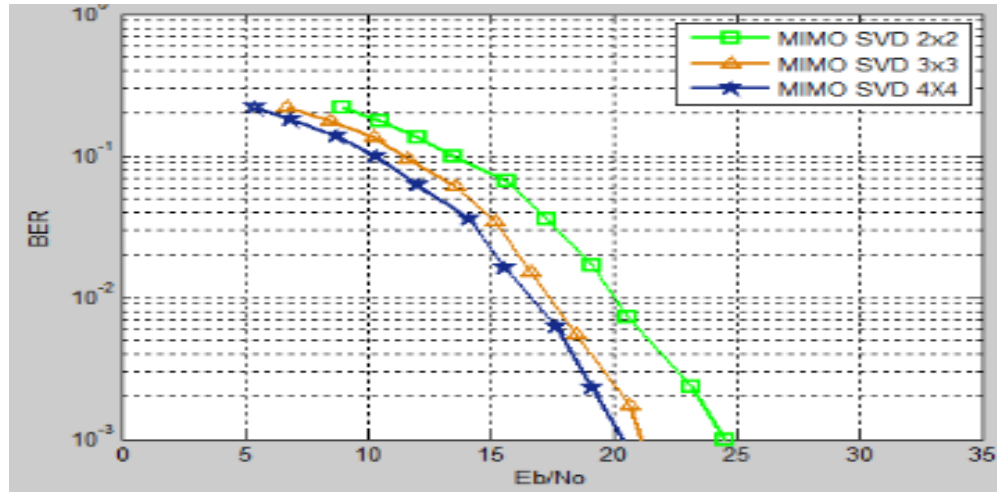


Figura 1.5 Desempeño del BER para diferentes combinaciones de antena [28]

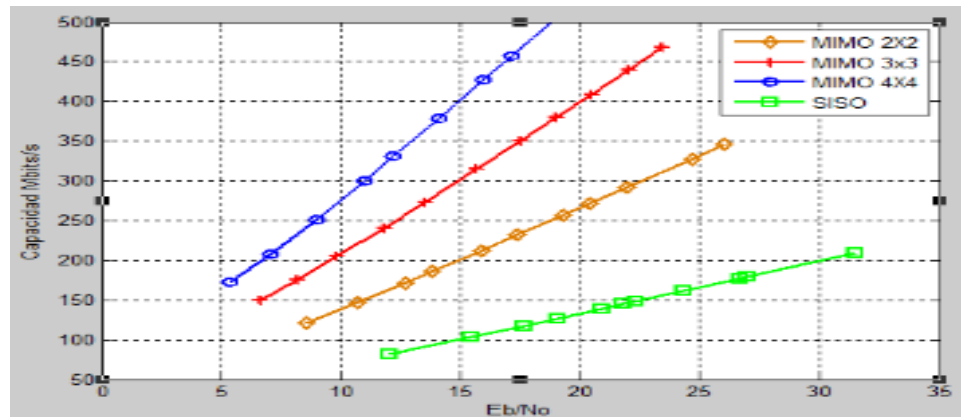


Figura 1.6 Capacidad de los sistemas MIMO[28]

➤ Tecnología OFDM

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*) permite relacionar técnicas de compensación de canal relativamente simples en canales de desvanecimiento selectivos de frecuencia, además, se puede utilizar la diversidad y la retroalimentación del canal

efectivamente para mejorar la robustez y el rendimiento. Por lo tanto, la división de frecuencia ortogonal se prefiere en la mayoría de los modelos modernos. Los sistemas de comunicación modernos como el sub- digital línea de escritura (DSL), comunicaciones por línea de alimentación, y redes de área local inalámbricas (WLAN). Ahora 4G celular también ha adoptado OFDM como base tecnología debido a estas ventajas. Esta tecnología presenta dos regímenes de acceso, los cuales son OFDMA que se utiliza en enlace descendente y SC-FDMA (*Single Carrier- Frequency Division Multiplex Access*) que se utiliza en el enlace ascendente [29].

1.5.2. Tecnologías para ofrecer los servicios de voz y mensajería en LTE

➤ Tecnologías VoLTE/VoLGA

VoLGA propone dejar que un MSC heredado proporcione servicios de voz y Servicios de SMS a LTE UE a través de una interfaz GERAN A o interfaz UTRAN Iu-CS. Este concepto se origina con acceso móvil sin licencia (UMA). UMA fue presentado y aceptado como estándar en los estándares 3GPP y pasó a llamarse Red de Acceso Genérico (GAN) para el lanzamiento 6. VoLGA fue diseñado para tener un impacto mínimo en las redes existentes; sin embargo, requiere soporte en la UE y la introducción del controlador de red de acceso VoLGA (VANC).

VoLTE es una iniciativa liderada por la Asociación GSM (GSMA) que tiene como objetivo definir exactamente cómo un operador LTE despliega IMS (*IP Multimedia Subsystem*) para transportar tráfico de voz. La iniciativa tiene como objetivo desarrollar especificaciones que describen claramente tres tipos de interacciones de voz IMS: interfaz de usuario a red (UNI), red a interfaz de red (NNI) y una interfaz de *roaming*. La especificación UNI presenta un conjunto de requisitos concretos sobre elementos IMS para una arquitectura VoLTE. Para señalización la UE debe soportar el registro, la originación y terminación como se especifica en la especificación SIP principal de IMS. Se debe usar compresión de señalización entre el UE y el Proxy CSCF y exige una lista de servicios suplementarios. Generalmente, la especificación UNI dicta una lista de las secciones de cumplimiento obligatorio de las especificaciones 3GPP y describe cómo se van a usar ciertas características [30].

Las diferencias entre VoLTE y VoLGA se observan en la siguiente figura:

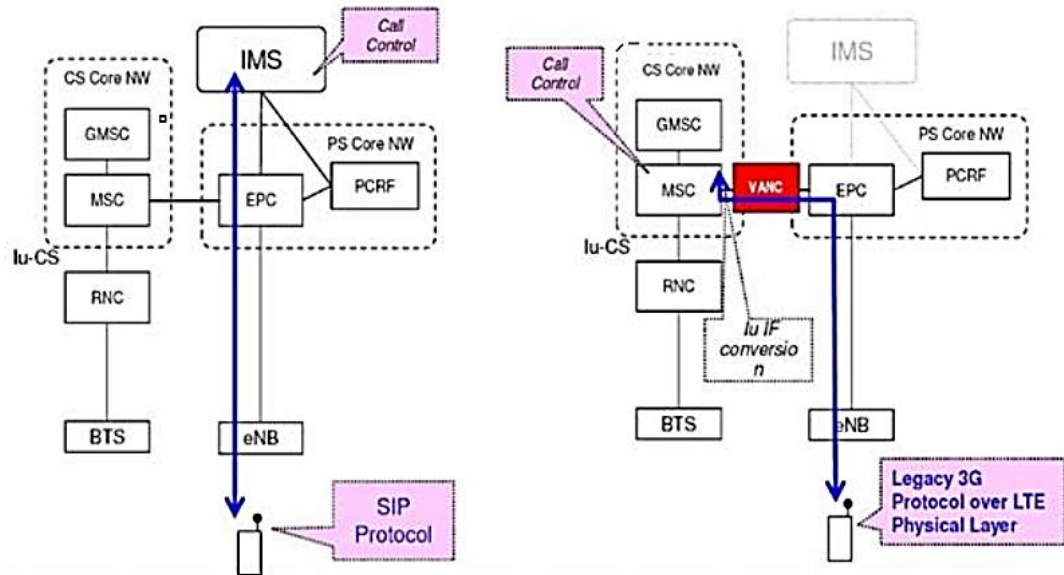


Figura 1.7 Diferencias entre VoLTE y VoLGA [30].

➤ Tecnología SRVCC

El servicio SRVCC para LTE entra en escena cuando un solo equipo de usuario de radio (UE) que accede a IMS, los servicios de llamadas de voz anclados cambian de la red LTE al dominio de conmutación de circuitos, mientras este es capaz de transmitir o recibir en solo uno de estos accesos de red en un momento dado. Esto básicamente elimina la necesidad de que un UE tenga múltiples tecnologías de acceso de radio (RAT). Para terminales de radio simple, los espacios de medición son necesario para permitir que el UE cambie a la red CS. Las brechas de medición definen los períodos de tiempo cuando no hay enlace ascendente o descendente con lo que el UE puede realizar las mediciones. El evolucionado NodeB (eNodeB, es decir, estación base LTE) es responsable de configurar el patrón de brecha de medición y se lo proporciona a la UE mediante el control de recursos de radio de señalización dedicada (RRC) [31].

➤ Tecnología CSFB

El respaldo de CS es una de las soluciones provisionales definidas por 3GPP para habilitar la voz y otros dominios de CS mediante la reutilización de la infraestructura CS, LTE proporcionará sólo servicios de datos, y para la iniciación o la recepción de una llamada de voz, se realizará el respaldo al dominio CS. Esta función sólo está disponible en una red donde la cobertura LTE se superpone a la cobertura CS, y donde el MME y el servidor MSC

puede comunicarse utilizando la interfaz SG definida para permitir el uso del dominio CS por parte del usuario de LTE. La funcionalidad de respaldo proporciona servicios de voz continuos sin la implementación de voz sobre IP (VoIP) en una red LTE [32].

CSFB es necesario porque 4G-LTE es todo basado en paquetes de red IP que no puede admitir llamadas con conmutación de circuitos. Cuando un dispositivo 4G-LTE se utiliza para realizar o recibir una llamada de voz o SMS, el dispositivo "recurre" a la red 2G o 3G para completar la llamada o entregar el SMS[33]. En la siguiente figura se ilustra una arquitectura simplificada EPS y UMTS para CS *Fallback* (líneas discontinuas: señalización; líneas sólidas líneas: señalización/datos).

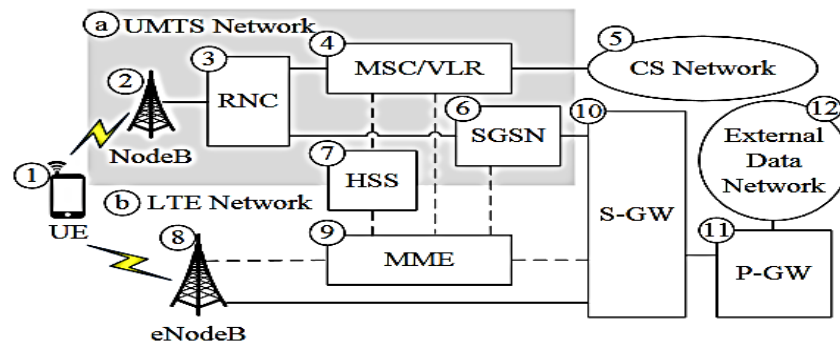


Figura 1.8 Arquitectura EPS y UMTS para CSFB [34].

1.5.3. Tecnologías LTE Advanced

La fuerza impulsora para seguir desarrollando LTE hacia LTE-Advanced, LTE R-10 es proporcionar tasas de bits más altas a un costo manera eficiente, y al mismo tiempo cumplir completamente con los requisitos establecidos por la UIT para IMT Advanced, también referido como 4G.

En LTE-Advanced, el enfoque está en una mayor capacidad:

- tasa de datos máxima aumentada, DL 3 Gbps, UL 1,5 Gbps
- mayor eficiencia espectral, desde un máximo de 16 bps/Hz en R8 a 30 bps/Hz en R10
- mayor número de suscriptores activos simultáneamente
- rendimiento mejorado en los bordes de las celdas, p. para DL 2x2 MIMO al menos 2,40 bps/Hz/celda.

Las principales funcionalidades nuevas introducidas en LTE-Advanced son *Carrier Aggregation* (CA), uso mejorado de técnicas de múltiples antenas y soporte para Nodos de Retransmisión (RN) [35].

Dado que LTE-A debe proporcionar compatibilidad de espectro, la compatibilidad con un ancho de banda más amplio en LTE-A es proporcionado a través de la agregación de múltiples componentes de portadora. Cada proveedor de componentes puede aparecer como operador LTE, mientras que los usuarios de LTE-A pueden transmitir y recibir en varios componentes de portadora simultáneamente. Existen tres posibles escenarios de agregación: portadoras contiguas y no contiguas agregación de componentes de portadoras en una sola banda, y agregación no contigua de componentes de portadoras sobre múltiples bandas.

Tabla 1.1 Escenarios de despliegue de LTE-A [36].

| Escenario de despliegue | | <i>Carrier Aggregation</i> |
|-------------------------|--|--|
| FDD | Simple banda contigua UL: 40 MHz DL: 80 MHz | UL:2x20MHz (3.5 GHz) DL:4x20 MHz (3.5 GHz) |
| | Múltiples bandas no contiguas UL:40 MHz DL: 40 MHz | UL: 10 MHz (1.8 GHz) ⁺ 10 MHz (2.1 GHz) ⁺ 20 MHz (2.6 GHz) DL: 10 MHz (1.8 GHz) ⁺ 10 MHz (2.1 GHz) ⁺ 20 MHz (2.6 GHz) |
| TDD | Simple banda contigua 100 MHz | 5x20 MHz (2.3 GHz) |
| | Simple banda no contigua 80 MHz | 2x20 MHz (2.6 GHz) ⁺ 2x20 MHz (2.6 GHz) |

Para la agregación de portadores de componentes no contiguos, cada operador debe cumplir con los requisitos de espectro LTE existentes tales como máscara de emisión, fuga de canal adyacente y emisión espuria para proporcionar compatibilidad con versiones anteriores y garantizar interferencia mínima a las portadoras adyacentes.

En caso de agregación de portadoras contiguas no necesita una gran banda de guarda. Quitando o relajando la banda de guarda entre portadoras adyacentes del mismo eNB, es posible un uso eficiente del espectro disponible. Además, para el enlace descendente, se puede usar un solo IFFT, lo que reduce complejidad de la implementación y proporciona un ahorro de costes. Sin embargo, debido a la trama de canal LTE de 100 kHz y 15 kHz espaciado de subportadoras, el espaciado entre las frecuencias centrales de las portadoras debe ser un múltiplo de 300 kHz para satisfacer ambas condiciones [36].

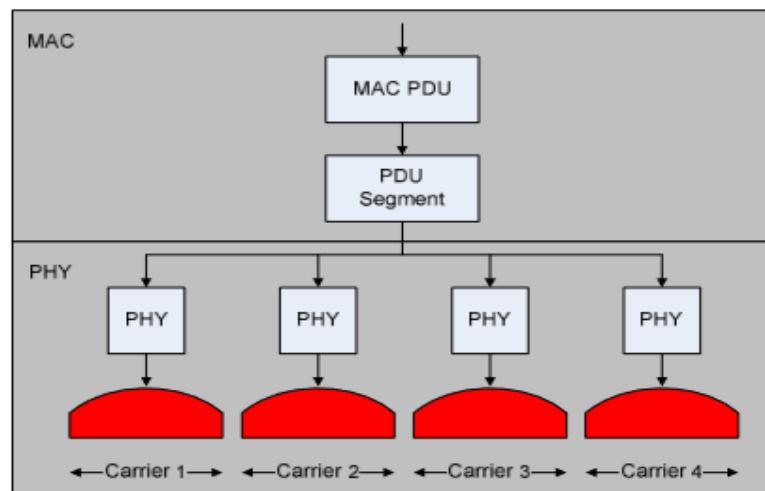


Figura 1.9 Interfaz MAC-PHY para *Carrier Aggregation* [36].

1.6. WTTx

WTTx (*Wireless to the x*), es una tecnología de banda ancha inalámbrica también conocida como acceso inalámbrico fijo, se ha desarrollado rápidamente en el mercado móvil en los últimos años. WTTx es una solución ideal para habilitar banda ancha instantánea, esta es una solución de acceso de banda ancha inalámbrica fija de Huawei que admite la evolución continua. Basándose en las redes móviles existentes, WTTx utiliza la solución de sinergia entre dispositivos y canales de Huawei, las herramientas de O&M (*Organization &*

Management) y gestión de servicios, y la innovadora tecnología de diferenciación de QoS (*Quality of Service*). Estas tecnologías ayudan a proporcionar acceso de banda ancha estable y de alta velocidad en varios escenarios, como hogares, acceso VPN de pequeñas y medianas empresas y verticales inalámbricos. El acceso de banda ancha fija en la red móvil con la mayor cobertura de población reducirá drásticamente los costos de implementación de banda ancha y adquisición de usuarios, aumentará los ingresos y desarrollará un entorno industrial en el que todo es ganancia para los diferentes gobiernos, operadores y usuarios finales [37].

La brecha digital es un problema bien conocido y según ITU-T *Broadband Report 2017*, solo el 15% de hogares de los países menos adelantados (PMA) tienen Acceso a Internet en el hogar, 43% en los países en desarrollo y 85% en los países desarrollados. Los desafíos continúan en la última milla de conectividad. Aprovechando las existentes arquitecturas de la red y del sitio, WTTx puede llegar rápidamente a hogares desconectados, proporcionando grandes ahorros en la implementación. En pocas palabras WTTx es una solución inalámbrica de acceso de banda ancha que es capaz de entregar una experiencia al usuario como la de la fibra, pero evitando la excavación de zanjas y el cableado, produciendo un tiempo de comercialización más rápido, una tasa de crecimiento de usuarios más rápida y período de recuperación más corto. Usando CPE como un enrutador doméstico inteligente, los operadores inalámbricos no solo pueden ofrecer el servicio MBB, sino también proporcionar acceso de banda ancha a teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, teléfonos fijos, TV, etc [38].

WTTx puede reutilizar los recursos de las redes GSM y UMTS existentes y puede usarse para identificar usuarios potenciales de banda ancha para evitar riesgos de inversión para los operadores. Las redes FTTx son complejas y tardan mucho tiempo en implementarse y lanzarse. La construcción mixta WTTx y FTTx puede acelerar el despliegue de banda ancha. Los UE WTTx son estacionarios. La capacidad inactiva de la red MBB existente se utiliza para desarrollar los servicios WTTx y luego se realiza la expansión de la capacidad bajo demanda. Los conocimientos globales muestran que el 60% de los usuarios de banda ancha son atendidos por solo el 30% de los sitios. En áreas densamente pobladas, la expansión de la capacidad se puede realizar en un solo intento para cualquier espectro dado en cualquier sitio de MIMO masivo de gran capacidad para mejorar su capacidad diez veces. Esto facilita el desarrollo de la red durante los próximos tres a cinco años. La solución de prioridad de UE

basada en SPID definida en las especificaciones 3GPP puede garantizar fácilmente la experiencia del usuario. Basado en las funciones de FWA, Huawei utiliza diferentes SPID para definir las prioridades de programación para los UE MBB y WTTx. Esto ayuda a controlar los PRB utilizados por los UE de WTTx según las prioridades de programación de los UE o de forma dinámica durante las horas pico para garantizar que la experiencia de MBB no se vea afectada. WTTx aprovecha el acceso fijo de FWA para mejorar la eficiencia espectral de FWA. La rentabilidad de WTTx es comparable a la de MBB [39].

Beneficiándose de 4G y 4.5G, las tarifas máximas de WTTx siguen aumentando. Las nuevas tecnologías como 4x4 MIMO, 256QAM, FDD+TDD CA, CA y MIMO masivos requieren solo de 40 a 60 MHz de espectro para permitir velocidades máximas de celdas de gigabit, por lo que WTTx basado en 4.5G puede generar una mejor banda ancha doméstica.

WTTx ya se ha adoptado ampliamente en todo el mundo, y no solo en los grandes mercados emergentes. La implementación simple y la viabilidad económica de WTTx han ampliado en gran medida el tamaño del mercado potencial para los operadores y han aumentado la penetración de la banda ancha, lo que ha generado enormes beneficios socioeconómicos. En China, por ejemplo, el gobierno lanzó una Estrategia Nacional de Banda Ancha en 2013, y en 2014 el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información publicó una política que promueve la penetración de la banda ancha rural. Esto generó una respuesta positiva en las provincias centrales y occidentales de la nación, con Jilin Mobile aumentando la penetración de banda ancha en 300 000 hogares rurales en solo un año.

Con el devenir de la era digital, la banda ancha universal se considera un derecho humano básico en muchos países. El éxito de WTTx en todo el mundo muestra cómo este nuevo enfoque es una forma efectiva de resolver el problema de la última milla. Mediante la combinación de cable e inalámbrica, la banda ancha universal se está volviendo más factible, abriendo un nuevo mercado de océano azul para los operadores y, en última instancia, conectando a los no conectados.[40]

CAPÍTULO 2. Planeamiento de Redes LTE

2.1 Planeamiento de redes LTE

Desde el momento en que se decide crear o simplemente modificar una red en lo primero que se debe pensar es en el planeamiento de esta. El planeamiento constituye el paso más importante a la hora de crear o modificar una red hoy en día. En los tipos de redes actuales los objetivos de planificación son:

- Obtener un grado de cobertura suficiente a lo largo del área geográfica seleccionada.
- Garantizar una mínima capacidad de red y calidad de servicio, que asegure una baja tasa de bloqueo de llamada y tasa de pérdida de conexión al usuario.
- Permitir un despliegue de la red que sea viable económicamente y permita su expansión de forma controlada durante el ciclo de vida del sistema.

Una adecuada planificación de red minimiza (o, al menos, retrasa) la inversión de capital, mejora la calidad del servicio ofrecido al usuario final (y, con ello, su satisfacción con el servicio) y reduce la necesidad de ajustes durante la fase de operación.

- El proceso de planificación de una red celular suele separar la red en dos segmentos, como son la red de transporte y la red de acceso radio. La planificación de la red de transmisión aborda el diseño de la infraestructura de equipamiento necesaria para enviar la información desde la estación base origen hasta el destino de dicha información (p.ej., otra estación base, internet o cualquier otro servidor de servicios). Este segmento de red puede dividirse en dos partes, en función de la lejanía a la estación base. Así, se diferencia el diseño de la red troncal, que incluye aquellos equipos de conmutación de alto nivel que conectan grandes zonas unas con otras y con los servicios ofrecidos por el operador, como

puede ser la interconexión con otras redes o el acceso a internet, y, por otro lado, el diseño de la red de acceso, que conecta las estaciones base con la red troncal.

- La planificación del radioenlace comprende el diseño de la infraestructura de equipamiento que afecta a la interfaz entre las estaciones base y el terminal de usuario. Entre otros aspectos, debe cubrir la definición de las áreas de servicio de cada estación base, la interacción entre estaciones base adyacentes o la capacidad del canal radio [41].

El proceso comienza con la definición de los criterios de diseño, especificando los requisitos de cobertura, calidad de conexión y capacidad, que pueden diferir dependiendo de la región geográfica. Con esos requisitos, se realiza el proceso de pre planificación, en el que se construyen los planes teóricos de cobertura y capacidad. El plan de cobertura incluye la definición de las áreas de cobertura, las probabilidades de servicio y los niveles de señal objetivo, mientras que el plan de capacidad incluye el perfil de usuarios y tráfico en las áreas de cobertura. En esta fase de pre planificación se realiza el proceso de dimensionado que permite estimar el número de emplazamientos necesarios, a partir de estimas de la capacidad que se puede obtener de una celda. A continuación, se busca y se selecciona la ubicación de los emplazamientos donde se sitúan las estaciones base. Con esa información, se determina el área de servicio de cada celda, que permite realizar los cálculos de propagación con los que estimar los niveles de señal de interferencia y la calidad de conexión ofrecida al usuario. Posteriormente se establece la configuración inicial de parámetros de los algoritmos de gestión de recursos radio y se fija la máxima carga de cada celda. El resultado final de la planificación radio son los planes de cobertura, las estimas de capacidad, los planes de interferencia, los balances de potencia, los planes de frecuencia y el plan de parámetros. Estos planes se mejoran en la fase de operación, cuando se dispone de medidas de la red real.

El problema de la planificación radio se ha tratado extensamente en la bibliografía, dado que cada tecnología radio tiene su propia problemática. En GSM, la planificación radio se centra en la estimación de la cobertura y en la asignación de frecuencias [42]. En UMTS y HSPA el principal obstáculo es el acoplamiento entre la cobertura, la interferencia y la capacidad de las celdas [43].

En LTE, se mantiene el problema del compromiso entre la cobertura y la capacidad del sistema, pero irrumpe con fuerza la planificación de parámetros radio, algo que, en anteriores

tecnologías, parecía relegado a la fase de operación de red. La causa de esta irrupción es la disponibilidad de herramientas de cálculo automáticas que permiten abordar problemas numéricos que hasta ahora no se podían resolver de forma manual [44].

Las herramientas de planificación disponibles hoy en día facilitan la actualización de los planes construidos en la fase de planificación con medidas recogidas durante la fase de operación. Este proceso se conoce como re planificación basada en medidas, por distinguirlo del proceso de optimización de red, donde no se hace uso de los planes anteriores. Ambos procesos comparten el objetivo de mejorar la red. Sin embargo, la re-planificación de red solo se realiza de forma periódica, con tiempos largos entre actuaciones, para corregir grandes desajustes, mientras que la optimización de red busca ajustar al máximo la configuración de parámetros para obtener el máximo rendimiento en todo momento. La re-planificación es el paso previo a la ampliación de capacidad de la red mediante la agregación de nuevos equipos.

La re-planificación puede realizarse de forma reactiva o proactiva. En la estrategia de planificación reactiva, los ajustes se realizan cuando se alcanza algún límite de capacidad (p.ej., cuando ha ocurrido un problema de congestión) o cuando las condiciones del sistema cambian de forma no prevista (p.ej., cuando se incluyen nuevos equipos de forma temporal para cubrir algún evento o se modifican los parámetros de configuración para solventar un problema inesperado). Como alternativa, una estrategia de planificación proactiva lleva a cabo acciones correctoras antes de que los problemas de capacidad existan mediante técnicas de predicción y estimación avanzadas. De esta forma, el operador de red se anticipa a posibles problemas de congestión antes de que estos tengan lugar, mejorando, a consecuencia de ello, la calidad del servicio ofrecida a los usuarios.

La tendencia actual en las redes móviles es incrementar las tareas de planificación proactiva. Durante la fase de diseño, una planificación proactiva implica la búsqueda de la mejor configuración inicial de la red, según las condiciones de tráfico y propagación previstas. Durante la fase de explotación, una planificación proactiva requiere detectar posibles cuellos de botella del sistema con antelación a que éstos ocurran. Al mismo tiempo, una estrategia proactiva permite adaptar la configuración de la red a los cambios de topología y condiciones producidos por la expansión del servicio. Todas estas tareas solo se pueden llevar a cabo con

la ayuda de herramientas de automatización [45]. En la figura 2.1 se observan las fases antes descritas.

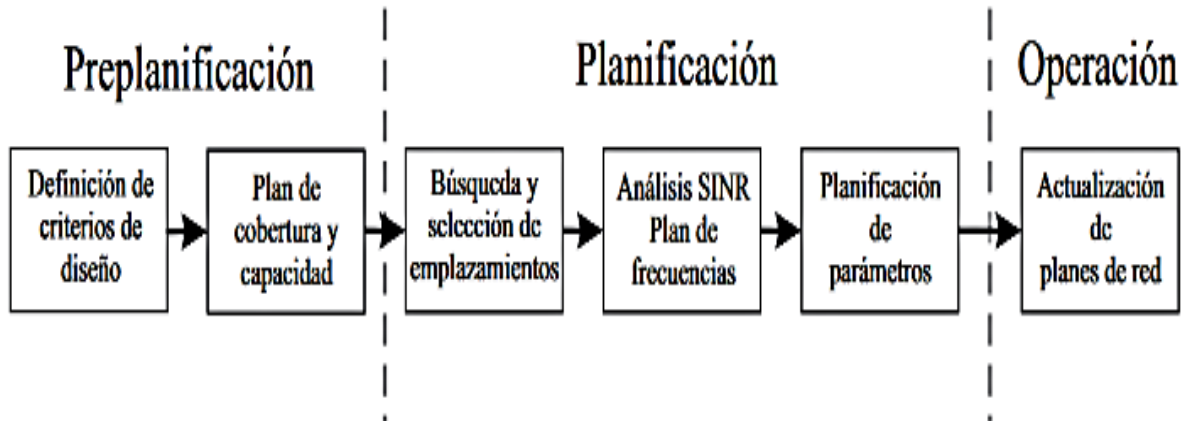


Figura 2.1 Proceso de planificación de red [45].

2.1.1 Planeamiento automático de redes LTE:

El creciente tamaño y complejidad de las redes móviles dificulta enormemente las tareas de planificación y optimización de la red por parte del operador. Para reducir los costes de operación y eliminar los errores humanos introducidos por el manejo de la red, se plantea la automatización de todas las tareas de gestión de red. Con este objetivo, en los últimos años se han propuesto numerosas técnicas automáticas de planificación y optimización de red, englobadas bajo el término de redes auto organizadas (SON). Bajo este término, se agrupan todas aquellas redes que implementan capacidades de configuración, ajuste y resolución de problemas automáticas, sin intervención del operador. Aunque SON puede aplicarse a cualquier tipo de red, es en el estándar LTE donde se ha generalizado el uso de estas técnicas [46].

Para el operador, los principales beneficios de la aplicación de SON se resumen en la reducción de los costes de operación de la red, la liberación del personal del operador de tareas rutinarias que han de repetirse en el espacio y/o en el tiempo, y el incremento del rendimiento y capacidad de la red, que permite retrasar las inversiones de capital para ampliar los recursos de la red. Para el usuario, la aplicación de SON conlleva mejor calidad de

servicio y una reducción de las tarifas como consecuencia de los menores costes de operación.

Existen varias posibilidades de incluir funcionalidades SON en una red de comunicaciones móviles. En función de su ubicación, los sistemas SON se clasifican en centralizados y descentralizados:

- Los sistemas SON centralizados son aquellos en los que se añade un equipamiento adicional que recopila los datos necesarios del *Network Management System* (NMS), los analiza y propone cambios en la configuración de la red. Estos cambios se envían a las estaciones base a través del intercambio de información del NMS.
- Los sistemas SON descentralizados (o distribuidos) son aquellos en los que se dota a cada estación base (eNB, en LTE) de alguna funcionalidad SON, que funciona de forma independiente o coordinada con otras entidades del mismo nivel.

Con un esquema SON centralizado se pueden implementar algoritmos de re-planificación automática de parámetros radio. En este esquema, el servidor SON es el elemento de red que ejecuta el algoritmo de planificación. Dicho elemento debe conectarse al NMS, donde se recoge la información de los parámetros de configuración de red y las estadísticas de rendimiento. Toda esta información se recopila en el NMS gracias al envío constante de información de los UE, eNB y otras entidades de la red hacia el NMS a través de la red de transporte. El servidor SON procesa toda la información y aplica los algoritmos de planificación, que dan como resultado una nueva configuración de parámetros de red. La nueva configuración se envía en sentido inverso por el NMS a través de la red de transporte hacia los elementos de red implicados. En el ejemplo de la figura, los parámetros de configuración viajan del NMS hacia los eNB y los eNB se encargan de transmitirlos por la interfaz radio hasta los UE.

En esta estructura centralizada, el proceso de re planificación puede lanzarse cada vez que se añade un nuevo eNB en la red. En este caso, el nuevo eNB envía su localización y configuración inicial al NMS. El servidor SON, con toda la información recopilada del NMS, estudia la nueva topología y selecciona una nueva configuración de parámetros adaptada a la nueva situación. Esta nueva configuración se difunde al nuevo eNB y al resto de eNB colindantes, que deben cambiar su configuración para adaptarse a la nueva situación [47]. En

la Figura 2.2 se ilustra un ejemplo de implementación de algoritmo SON centralizado para la configuración automática de parámetros del control de potencia.

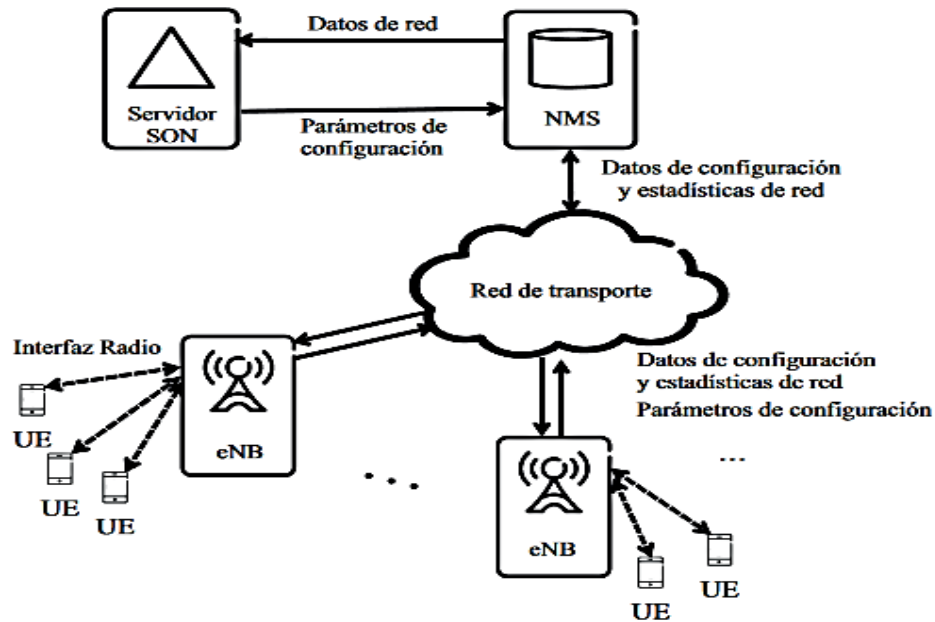


Figura 2.2 Planificación automática de parámetros en una estructura SON centralizada [45].

Del mismo modo, se pueden implementar algoritmos de planificación automática como parte de un sistema SON distribuido. En este caso distribuido, cada eNB tiene capacidad de procesamiento SON adicional. Esta capacidad permite al eNB analizar una serie de datos históricos sobre la demanda de tráfico en un canal de comunicación. Con esta información, el eNB es capaz de predecir la evolución de la demanda y detectar la próxima superación de la capacidad máxima del canal en la celda concreta. Así, el eNB estima en cuánto tiempo el canal será un cuello de botella para el funcionamiento normal del eNB. Esa predicción se envía a través de la red de transporte al NMS. Con esta alarma, el operador puede ampliar la capacidad del canal reconfigurando sus parámetros, evitando el problema de congestión antes de que ocurra.

La decisión final de si un algoritmo de planificación automática debe realizarse de forma distribuida o centralizada depende del problema concreto. La solución distribuida suele tener un menor tiempo de respuesta y una menor carga computacional. En cambio, la solución centralizada puede abordar problemas de planificación global que requieren tener en cuenta las interacciones entre múltiples elementos. Además, la solución centralizada facilita el

manejo de equipos de diferentes fabricantes [47]. En la Figura 2.3 se muestra el esquema de una funcionalidad SON distribuida para la detección de cuellos de botella en un canal de comunicación de la interfaz radio.

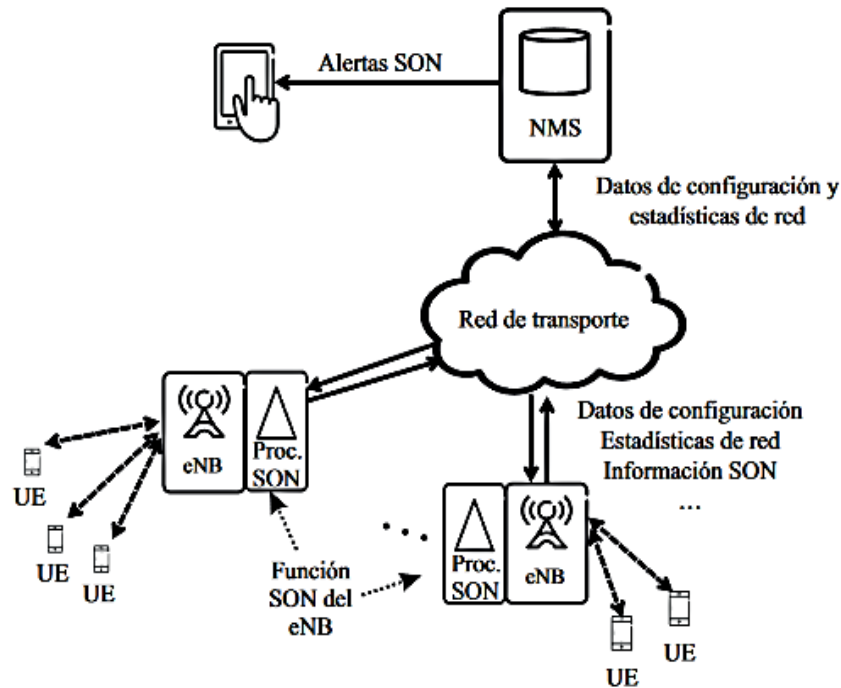


Figura 2.3 Detección de problemas de capacidad en una estructura SON distribuida [45].

2.1.2 Optimización de redes LTE:

La optimización de la red LTE se refiere principalmente a la optimización previa y la continua optimización antes y después del lanzamiento de la red. Los resultados de la optimización de la red y el nivel de trabajo de optimización de la red están directamente relacionados con el rendimiento futuro de la red en cuanto a estabilidad y capacidad.

Una buena optimización de la red puede reducir completamente el nivel de interferencia de toda la red, mejora el rendimiento de la red y la tasa de éxito de llamadas, reduce la interrupción de servicios, mejora el tráfico de datos, optimiza el *handover* de toda la red, y mejora la capacidad de la red.

El trabajo de optimización de red es un trabajo diario y continuo. La optimización es necesaria para que el rendimiento de la red satisfaga ciertos umbrales u objetivos acordados previamente con el operador llamados indicadores clave de rendimiento (KPIs: *key*

performance indicators). Después de que una red es construida y antes de lanzarse al aire, es necesario realizar la optimización previa al lanzamiento donde el proceso común es dividir la red en grupos de sitios (*clusters*) y optimizar estos grupos para lograr los KPIs acordados. La cantidad de optimización (previa al lanzamiento) necesaria depende de la calidad de la planificación. Los cambios durante la optimización previa al lanzamiento son principalmente físicos (por ejemplo, *tilts* y *azimuths* de las antenas) aunque pueden incluir también cambios de algunos parámetros con el objetivo de optimizar la cobertura y la calidad de la red. Como hay muy poco o ningún tráfico en la red, los contadores no proporcionan información estadísticamente confiable. Por lo tanto, la prueba de la red es el principal método de optimización durante la etapa previa al lanzamiento para lograr ciertos KPIs. Después del lanzamiento, las redes están siempre cambiando (por ejemplo, condiciones de tráfico, adición de nuevos sitios, nuevas actualizaciones de software) por lo que aún se necesita optimización para mantener el alto nivel de rendimiento definido por los KPIs. Como hay tráfico en la red, la información del contador es confiable y es posible tener una visión centralizada de cómo la red está funcionando.

En términos generales, la optimización previa al lanzamiento se centra en un ajuste "grueso" de la red y la optimización basada en contador se centra en un ajuste fino de la red (es decir, basada en parámetros). Es posible que aún se necesiten algunas pruebas para satisfacer las demandas del operador y optimizar las redes (optimización posterior al lanzamiento) aunque el alcance será menor que durante el la optimización previa al lanzamiento [48].

2.1.3 Indicador clave de rendimiento (KPI):

El proceso de optimización de la red 4G/LTE incluye los efectos de múltiples factores que deben ser considerados cuidadosamente. Los indicadores KPI deben seleccionarse en una forma en que pueden medir el rendimiento de los usuarios finales. Los KPI se pueden utilizar para seguimiento y optimización de las actuaciones de la red de radio para proporcionar mejor QoS en la red 4G/LTE.

La movilidad: es una de las funcionalidades fundamentales, que posibilita servicios continuos para los usuarios móviles dentro de una zona en particular, cuando son móviles. KPI de movilidad están relacionados con el Traspaso (HO). Las medidas incluyen el número

de HO dentro del E-UTRAN (intra HOs) y entre las diferentes tecnologías de radio (interRAT HOs). Estas mediciones deben realizarse a nivel de celda o para un grupo de celdas.

Los KPI relevantes son:

- *Intra-frequency Handover Success Rate.*
- *Inter-frequency Handover Success Rate.*
- *Inter-RAT Handover Success Rate (LTE to WCDMA).*
- *Inter-RAT Handover Success Rate (LTE to GERAN).*

Integridad: los parámetros KPI de integridad muestran el impacto de E-UTRAN en la calidad del servicio. Los siguientes parámetros se calculan a nivel de celdas o *clusters*:

- *Service Downlink Average Throughput:* Este parámetro tiene algunos indicadores, que podría usarse para el tráfico de enlace descendente real durante las horas pico.
- *Service Uplink Average Throughput:* Este parámetro se utiliza para evaluar el tráfico del enlace ascendente durante las horas pico.
- *Cell DL Average Throughput:* Este parámetro evalúa la velocidad de datos del enlace descendente en kbps.
- *Cell UL Average Throughput:* Este parámetro evalúa la velocidad de datos del enlace ascendente en kbps.
- *Cell DL Maximum Throughput:* Este parámetro se calcula en base al máximo *bitrate* en el enlace descendente, medido cada segundo.
- *Cell UL Maximum Throughput:* Este parámetro se calcula en base a la máxima tasa de bits en el enlace ascendente, medida cada segundo.

Disponibilidad: los KPI de disponibilidad miden el porcentaje de tiempo durante el cual las celdas de la red no han estado disponibles. Según 3GPP, se considera que una celda está disponible cuando eNodeB puede ofrecer servicios E-RAB en esa celda en particular.

Rentabilidad: que se define como la capacidad de un usuario para retener la conexión una vez para la duración deseada, este KPI indica la capacidad de retener / sostener la llamada: caída de llamada, finalización de llamada, restablecimiento de la conexión RRC y tasa de error de tráfico entrante IP [49].

2.2 Herramientas:

Gracias al avance de la tecnología en el campo de la informática y el desarrollo de software, existen actualmente softwares que posibilitan llevar a cabo un estudio a través de simulaciones de redes móviles, lo cual es de gran ventaja, pues se puede obtener con mucha exactitud los parámetros necesarios para saber si es factible llevar a cabo lo que se tiene como proyecto. Entre los softwares de simulación más utilizados se encuentran Atoll y Radio Mobile.

En la siguiente tabla se exponen las diferencias entre Atoll y Radio Mobile:

Tabla 2.1 Comparación entre Radio Mobile y Atoll

| Parámetros | Radio Mobile | Atoll |
|------------------------|--|---|
| Sistema de frecuencias | Esta limitado en el trabajo con sistemas que van desde los 20 MHz hasta los 200 MHz | Trabaja en un rango mayor dependiendo de la tecnología que se emplee |
| Mapas | Mapas que muestran distribución visual de objetos de terreno como carreteras, zonas rurales y urbanas | Permite cargar mapas de mayor cantidad de datos geográficos que ayudan a tener mejor precisión. |
| Mapas de Altitud | Los mapas de altitud de ambos softwares tomados de los sitios recomendados por los fabricantes tienen diferencias apreciables en cuanto a los valores de altitud del terreno | |

El objetivo de este trabajo es medir en que magnitud cambian los parámetros de la red móvil de Camagüey al implementar sobre su propia estructura la tecnología WTTx, cambiando la actual configuración de MIMO 4x4 en la banda de 1800 MHz por MIMO 2x2 utilizando entonces 2 salidas para LTE a 1800 MHz y las otras 2 salidas para soportar esta tecnología

en la banda de 2100 MHz. Para esto, debido a la anterior comparación entre los softwares disponibles se utilizará la herramienta de simulación de redes móviles Atoll.

2.2.1 Atoll:

Atoll es un software RNP desarrollado por la empresa Forsk y se presenta con un entorno de planificación de radio basado en ventanas, fácil de usar, que da soporte a operadores de telecomunicaciones inalámbricos durante todo el tiempo de la vida de la red. Más que una herramienta de ingeniería, Atoll es un sistema de información técnico, abierto, escalable y flexible que puede integrarse fácilmente en otro sistema de telecomunicaciones, aumentando la productividad y disminuyendo los tiempos de desarrollo. Atoll está formado por un módulo principal, al que se le pueden ir añadiendo módulos de las diferentes tecnologías que poseen. En cada plantilla se proporciona una estructura adecuada a la tecnología en la que se basan. Las diferentes tecnologías que Atoll tiene disponible, dependiendo de la configuración instalada en el equipo, son:

- **GMS/GPRS/EPRS:** Esta plantilla se utiliza para modelar y planificar tecnologías de segunda generación (2G), basadas en TDMA.
- **CDMA2000:** Esta plantilla se utiliza para modelar tecnologías de tercera generación (3G) basadas en CDMA2000 (evolución de CDMA).
- **IS-95 CDMAONE:** Esta plantilla se utiliza para modelar sistemas de segunda generación (2G) basados en CDMA.
- **Microwave Radio Links:** Permite modelar enlaces de radio, como parte de una red de telecomunicaciones para cualquier plantilla.
- **UMTS HSPA:** UMTS; HSDPA y HSUPA (estos últimos conocidos como HSPA) son sistemas de tercera generación (3G) que se basan en la tecnología WCDMA. Esta plantilla se utiliza para este tipo de sistemas, puesto que WCDMA y CDMA son incompatibles (a pesar de ser tecnologías similares).
- **WIMAX:** Esta plantilla ha sido desarrollada en cooperación con los proveedores de equipos WIMAX. Actualmente Atoll soporta los estándares IEEE 802.16d y 802.16e [50].

ATOLL permite una amplia variedad de escenarios de implantación. Desde un único servidor, hasta configuraciones que usen computación paralela y distribuida.

Las principales características de Atoll son las siguientes:

- **Propiedades avanzadas en el diseño de redes:** herramienta de cálculo de propagaciones de altas prestaciones, soporta redes multicapas y jerárquicas, modelado de tráfico, planificación automática de frecuencias y códigos y optimización de red. Soporta tecnologías GSM/TDMA, GPRS- EDGE, CDMA IS-95, W-CDMA / UMTS, CDMA 2000. Permite planificación de redes de tecnologías híbridas (GSM/UMTS, GSM/GPRS, CDMA/CDMA 2000...).
- **Arquitectura abierta y flexible:** soporta entornos multiusuarios gracias a una arquitectura de bases de datos innovadora, que permite compartir datos, gestionar la integridad de dichos datos y una sencilla integración con otros sistemas de telecomunicaciones. Permite la integración de módulos propietarios (modelos de propagación y AFP) gracias a un conjunto de interfaces de programación (API). También permite la integración de macros.
- **Cálculos distribuidos y paralelos:** ATOLL permite el reparto de la computación entre distintas estaciones de trabajo y soporta cálculos en paralelo en servidores multiprocesador, reduciendo significativamente los tiempos de simulación y de predicción, sacando el máximo partido del hardware disponible.
- **GIS de última generación:** ATOLL soporta datos geográficos multi- formato y multi-resolución y la integración con herramientas GIS. Permite cargar complejas bases de datos con información geográfica y mostrarlas de manera interactiva con múltiples capas, incluyendo las de los estudios de ingeniería y predicción. Incluye editor de raster y vectorial [51].

2.2.2 NetMonitor:

NetMonitor es una aplicación disponible para Android en la que se pueden ver detalles de la conexión, intensidad de señal, tipo de conexión, datos de la antena a la que se conecta, antenas cercanas, etc [52].

Es una aplicación gratuita que se descarga desde *Play Store*. Al abrirla se observa un resumen de las antenas cercanas y la intensidad de señal con cada una de ellas, recordar que los

resultados dependerán del móvil utilizado para hacer medidas. También se visualiza el tipo de conexión de datos (EDGE, HSDPA, LTE, etc).

Los acrónimos que aparecen en la imagen número 2.4 son:

Tabla 2.2 Acrónimos utilizados en NetMonitor

| Acrónimo | Descripción |
|--|---|
| TA (<i>Tracking</i>) | El conjunto de varios eNodoB constituye un área de seguimiento, definida por el operador. Mientras el terminal está en estado inactivo su ubicación es conocida por la red LTE a nivel TA en lugar de nivel celular |
| TAC (<i>Tracking Area Code</i>) | Cada área de seguimiento tiene un código único llamado código de área de seguimiento de 16 bits |
| CI ó CID (<i>Cell Identifier</i>) | Es un número generalmente único que se utiliza para identificar cada EB o sector de una EB dentro de un código de área de ubicación. |
| CQI (<i>Channel Quality Indicator</i>) | Es la información que UE envía a la red, por tanto, un indicador de calidad del canal. |
| EARFCN LTE (<i>Evolved-UTRA Absolute Radio Frequency No</i>) | Identifica de forma única la banda LTE y la frecuencia de la portadora en MHz. |
| RSSNR (<i>Reference Signal Signal To Noise Radio</i>) | Que mide el ruido de la línea móvil en dB. |
| RSRP (<i>Reference Signal Received Power</i>) | Señal de referencia de potencia recibida. |
| PCI (<i>Physical Cell Identity</i>): | Identificadores de células físicas, en redes LTE proporcionan un valor pseudo-único para identificar eNodeBs. |

| | |
|---|---|
| RSRQ (<i>Reference Signal Received Quality</i>) | Calidad de la señal de referencia recibida. |
|---|---|



Figura 2.4 Vista de la aplicación NetMonitor [53].

2.2.3 NetMonster

NetMonster recopila, muestra y almacena información sobre torres de telefonía cercanas. Cada torre tiene su conjunto único de identificadores y NetMonster se los mostrará. Durante la recolección, automáticamente intenta adivinar la ubicación de cada torre. En áreas y países seleccionados, las ubicaciones precisas están disponibles [54].

Ofrece todos los datos que proporciona su teléfono inteligente a través de Android. Es parcialmente de código abierto porque está basado en NetMonster Core, compilación de biblioteca sobre Android.

Entre las principales funcionalidades de la aplicación se encuentran:

- Registro de celdas a las que se conecta su teléfono.
- Determinar la ubicación del transmisor en función de los datos disponibles públicamente.

- Edición manual de celdas.
- Pos-procesamiento de datos registrados, trayendo más datos a las celdas vecinas.
- Descargar datos de ubicación precisos para transmisores en países y regiones admitidos.
- Carga manual de datos a los administradores de ubicación [55].

CAPÍTULO 3. Evaluación de la solución propuesta.

3.1 Descripción del caso de estudio

En este caso como se analizará el *cluster* correspondiente a la red LTE de la ciudad de Camagüey, este contiene 30 sitios proporcionando cobertura contigua al centro de la ciudad. Para el despliegue de la red WTTx se mantendrá los mismos *clusters* LTE y la misma infraestructura, es decir se mantienen las características de los emplazamientos tales como las inclinaciones, las alturas y los azimuts de las antenas. Debido a que se utilizaran los mismos *clusters* pues los radios (*feeders*) son los mismos por lo que no varía la potencia de transmisión. Actualmente las antenas están trabajando utilizando MIMO 4x4 ya que las antenas presentan 4 bocas proporcionando LTE y LTE-A a 1800 MHz, con el establecimiento de la tecnología WTTx esto cambiaría y se utilizaría entonces MIMO 2x2 entonces empleando 2 bocas de antena para LTE y LTE-A a 1800Mhz y las otras dos se emplearían para WTTx a 2100MHz. A continuación, en la tabla 3.1 se muestran las características de los transmisores para cada una de las tecnologías que integran la red (LTE, LTE-A y LTE para WTTx).

3.2 Características de los equipos

Tabla 3.1. Características de los Radios.

| Transmisor | Azimuth (grados) | Tilt (grados) | Altura (m) | Ancho de banda del canal (MHz) | Potencia (w) | MIMO | Antena |
|-----------------|---------------------|------------------|---------------|---|-----------------|-----------------|--|
| LTE | 0-300 | 0-16 | 9-60 | 20 | 30 | 2x2 o 4x4 | 1800 MHz, 65 grados, 17 dBi, 2 Tilt |
| LTE-A (2-CA) | 0-300 | 0-16 | 9-60 | 20 | 60 | 2x2 o 4x4 | 1800 MHz, 65 grados, 17 dBi, 2 Tilt |
| LTE (WTTx) | 0-300 | 0-16 | 9-60 | 10 | 30 | 2x2 | 2100 MHz, 65 grados, 17 dBi, 2 Tilt |

3.3 Evaluación de la solución propuesta con el Atoll

Como se planteó en el epígrafe 3.1 se analizará el *cluster* correspondiente a la ciudad de Camagüey como se observa en la Figura 3.1.



Figura 3.1 *Cluster* de estudio

Los objetivos de esta simulación son:

- Mostrar el desempeño actual de la red LTE.
- Mostrar el desempeño de la red LTE después del establecimiento de la tecnología WTTx.
- Medir la afectación debido al cambio de MIMO 4x4 a MIMO 2x2 en la red LTE.

Teniendo en cuenta estos objetivos los parámetros que se tendrán en cuenta en la simulación para llevar a cabo la comparación serán:

- Análisis de área de servicio efectiva (DL + UL).
- Cobertura por nivel de señal (DL).
- Cobertura por *Throughput* (DL).

A continuación, se mostrarán los resultados arrojados por la simulación para la red LTE actual con MIMO 4x4 y para la simulada con MIMO 2x2 para los parámetros mencionados respectivamente:



Figura 3.2 Análisis de área de servicio efectiva (DL + UL) para la red LTE actual (MIMO 4x4).



Figura 3.3 Análisis de área de servicio efectiva (DL + UL) para la red LTE modificada (MIMO 2x2).

Como se puede observar esta área de servicio efectiva disminuye debido a la disminución de transmisores y receptores para este escenario, como ya se ejemplificó en el epígrafe 1.4.2 ya que MIMO 4x4 es superior a MIMO 2x2. Como se puede observar en la figura 3.4 la

comparación entre los datos arrojados por un punto de prueba colocados en 77°51'52.95" W simulando un peatón, se miden los cambios en el RSPR del DL para LTE.

| Cell | RSRP (DL) (dBm) | Cell | RSRP (DL) (dBm) |
|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| 5_LTE_1(0) | -117.72 | 5_LTE_1(0) | -123.41 |
| 18_LTE_3(0) | -127.29 | 18_LTE_3(0) | -135.66 |
| 16_LTE_1(0) | -140.97 | 16_LTE_1(0) | -146.29 |
| 8_LTE_1(0) | -143.16 | | |
| 8_LTE_4(0) | -143.16 | | |
| 30_LTE_1(0) | -143.35 | | |

Figura 3.4 Datos de un punto de prueba colocado en x: 77°51'52.95" W.



Figura 3.5 Comparación entre los dos escenarios.

Comparison (LTE: Coverage by Throughput (DL) 0-LTE: Coverage by Throughput (DL) 0)
■ Pixels covered by the two predictions
■ Pixels covered MIMO 2x2 only
■ Pixels covered MIMO 4x4 only

Figura 3.6 Código de colores de la comparación entre los escenarios.

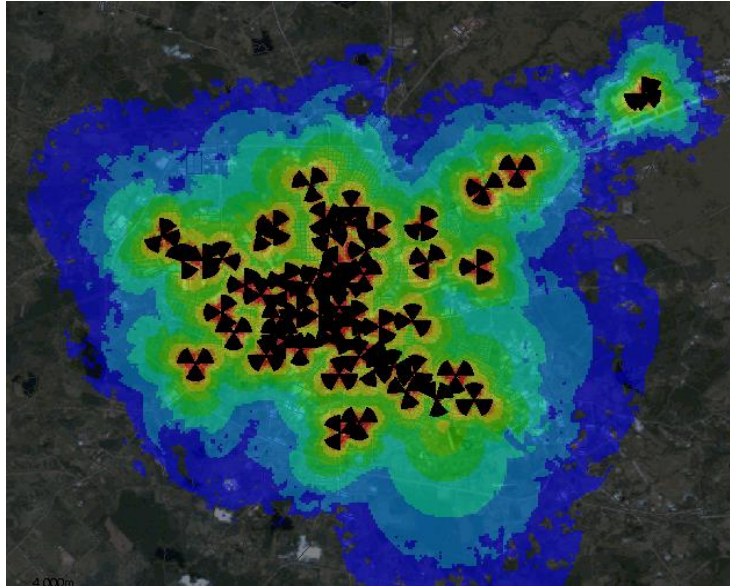


Figura 3.9 Cobertura por nivel de señal (DL) en la red LTE actual (MIMO 4x4)

Todos estos niveles de señal han sido comprobados con la utilización de los softwares NetMonster y NetMonitor, dando veracidad a los datos proporcionados por el Atoll los cuales se muestran en la figura 3.8. Esto fue realizado yendo a los lugares de interés en los cuales era necesario comparar los niveles de cobertura, luego de que el dispositivo móvil se conectara a la celda se chequeaba los niveles de intensidad, la calidad de transmisión del canal y la calidad de la señal de referencia recibida.

LTE: Coverage by Signal Level (DL) 0

- Best Signal Level (dBm) > = -70
- Best Signal Level (dBm) > = -75
- Best Signal Level (dBm) > = -80
- Best Signal Level (dBm) > = -85
- Best Signal Level (dBm) > = -90
- Best Signal Level (dBm) > = -95
- Best Signal Level (dBm) > = -100
- Best Signal Level (dBm) > = -105

Figura 3.10 Código de colores cobertura por nivel de señal

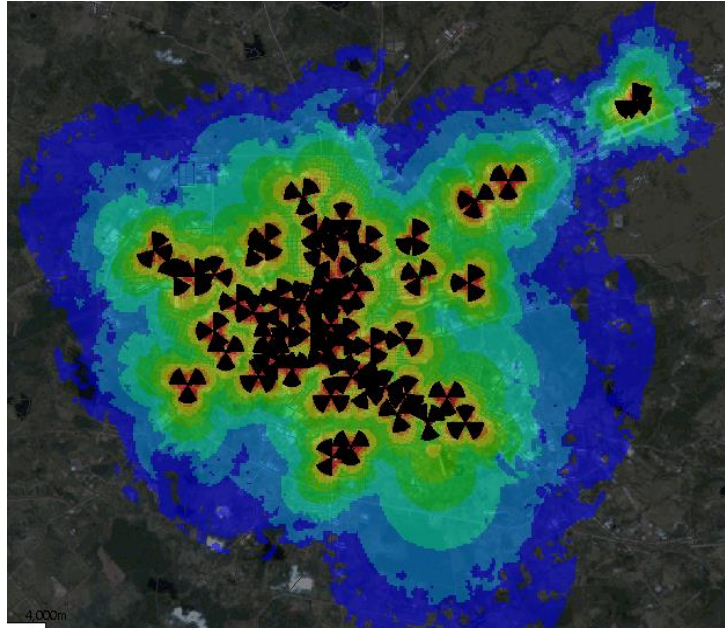


Figura 3.11 Cobertura por nivel de señal (DL) en la red LTE modificada (MIMO 2x2)

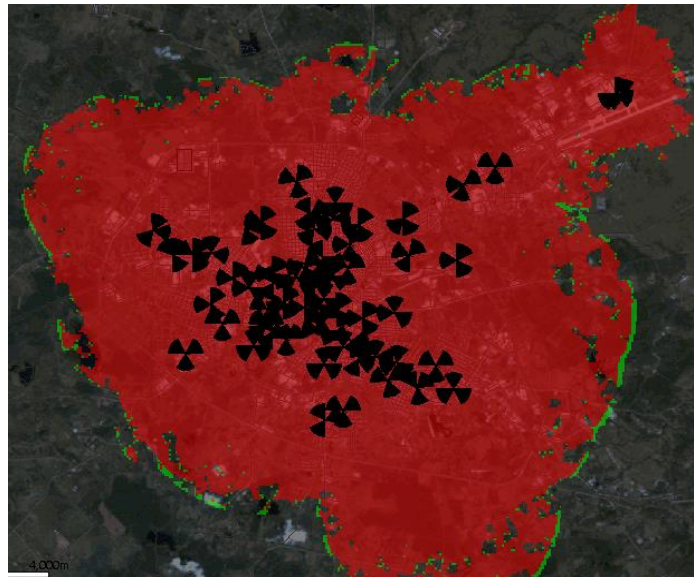


Figura 3.12 Comparación entre los dos escenarios.

Como se puede observar en la figura 3.10 a pesar de reducir la cantidad de transmisores no se afecta la cobertura por nivel de señal, este para la cobertura LTE sigue siendo el mismo en los dos escenarios lo cual es lo esperado.

Comparison (LTE: Coverage by Signal Level (DL) 0-LTE: Coverage by Signal Level (DL) 0)

- Pixels covered by the two predictions
- Pixels covered only MIMO 2x2
- Pixels covered only MIMO 4x4

Figura 3.13 Código de colores de la comparación.

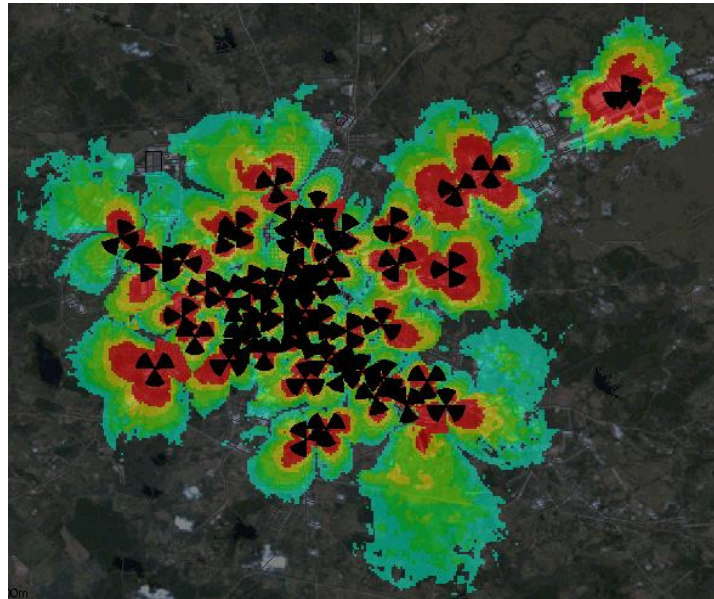


Figura 3.14 Cobertura por *throughput* (DL) para la red LTE actual (MIMO 4x4).

En la figura 3.15 se muestra un histograma del *throughput* dando los porcentajes de los sitios por picos de conexión, los porcentajes de mayor *throughput* son los más cercanos al centro de la ciudad.

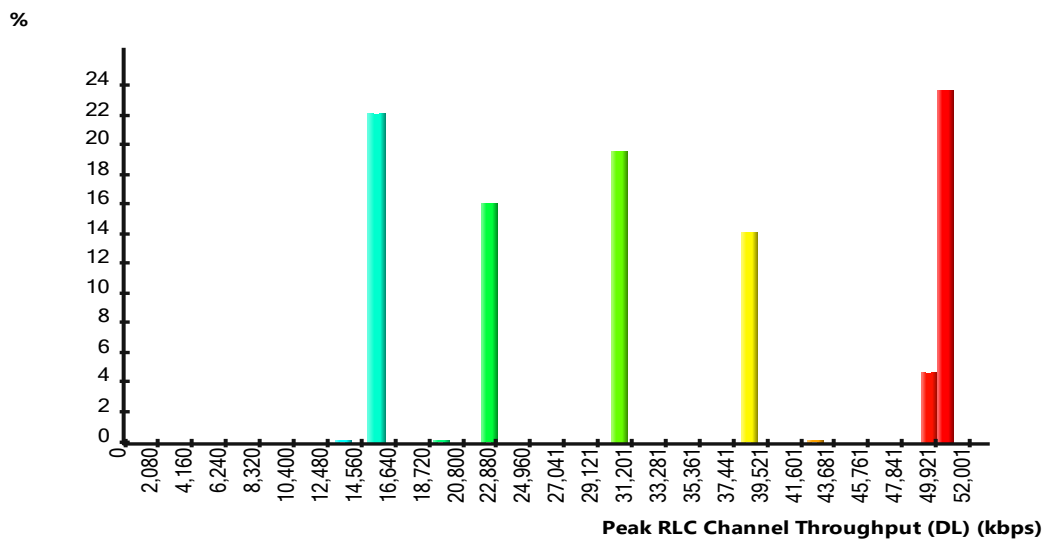


Figura 3.15 Histograma *throughput* MIMO 4x4 red actual.

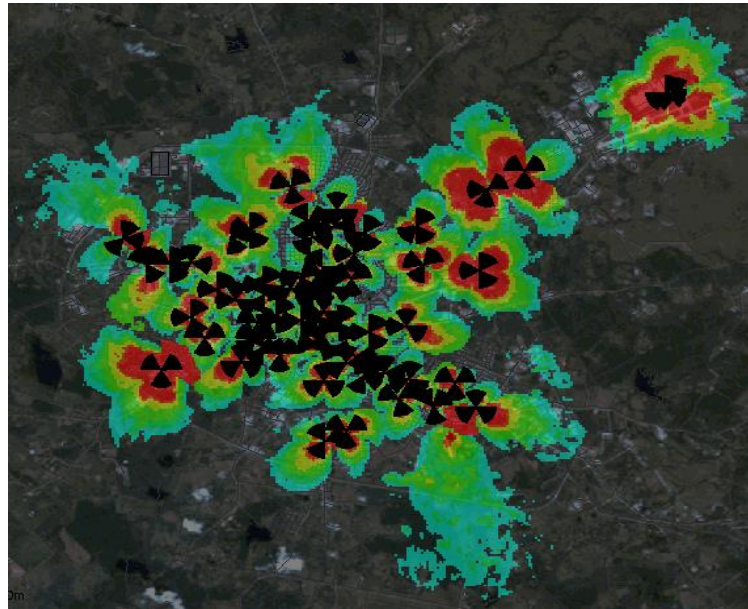


Figura 3.16 Cobertura por *Throughput* (DL) para la red LTE modificada (MIMO 2x2). El *Throughput* es el parámetro más afectado y el que presenta una variación mayor. Se puede observar una disminución importante en las áreas con mayor tasa de datos. Al comparar los histogramas de las figuras 3.15 (MIMO 4x4) y 3.17 (MIMO 2x2), las áreas de máxima transmisión (50000 kbps) disminuyen de un 23.6% a un 21.6%. Además, disminuye el alcance de las áreas que menor nivel de *Throughput* tienen, pasando de un nivel mínimo de servicio a un nivel de servicio nulo o inexistente.

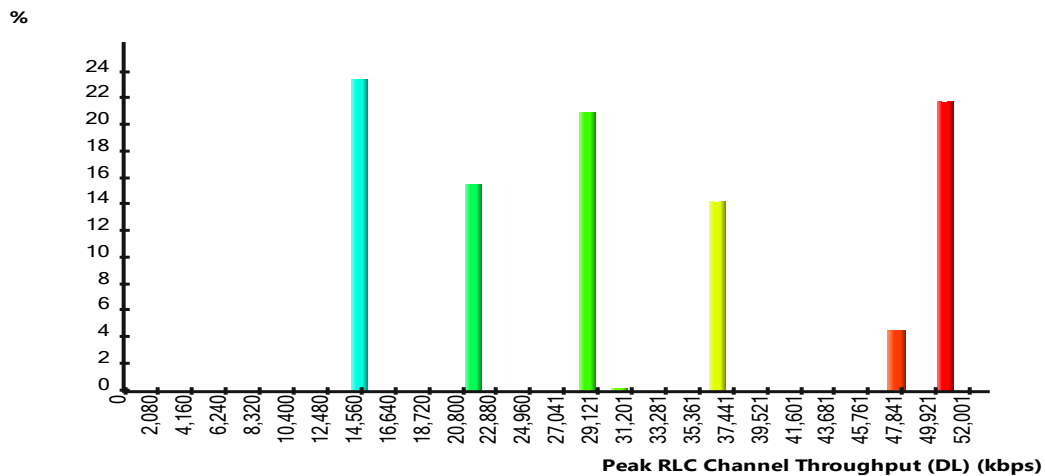


Figura 3.17 Histograma Throughput MIMO 2x2 red modificada.



Figura 3.18 Comparación entre los dos escenarios.

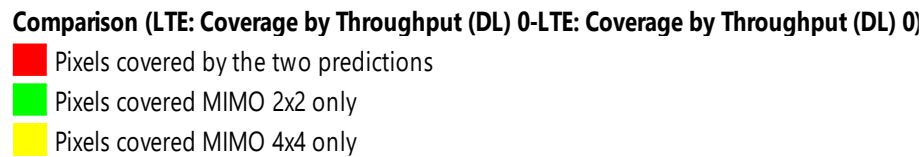


Figura 3.19 Código de colores de la comparación.

3.4 Evaluación de los resultados.

A partir de los distintos tipos de predicciones realizadas para las diferentes tecnologías se ha llegado a los siguientes resultados:

- Se pudo definir que el centro de la ciudad tiene buena cobertura LTE en general mientras que las afueras solo algunos sitios aislados los cuales se verán afectados en la calidad actual de la conexión.
- Se determinó que la cobertura por nivel de señal se mantiene prácticamente igual con MIMO 4x4 como con MIMO 2x2 por tanto los usuarios de la red no notaran cambio con respecto a la intensidad de la misma.
- Se llegó a la conclusión de que disminuye el número de colisiones de ID de celdas LTE.
- Disminuye el área de servicio efectivo, disminuye el *Throughput* en todas las áreas variando estas entre 0.5 % hasta 2% lo cual se verá reflejado en las velocidades de transmisión de datos y en la fluidez de la red sobre todo en las áreas más alejadas del centro de la ciudad

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A partir de los objetivos propuestos y los resultados alcanzados con la realización de este trabajo de diploma se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Las redes móviles han presentado una constante evolución, desde el surgimiento de la primera generación de estas hasta las redes actuales de cuarta y quinta generación, gracias a este desarrollo constante se han podido mejorar parámetros que intervienen en su desempeño tales como frecuencia, ancho de banda, capacidad de los canales de información, así como minimizar los tiempos de retardo y la latencia en la conexión. Todo esto permite el establecimiento de tecnologías como WTTx las cuales conciben las redes móviles tal y como son hoy y todos los servicios que brindan en favor de la informatización de la sociedad.
- El correcto planeamiento y la constante optimización de redes móviles es sumamente importante para el establecimiento de nuevas tecnologías de red tales como WTTx, debido a que esto facilita cumplir con los indicadores de rendimiento de red de una manera adecuada, proporcionando así una mejor experiencia para los usuarios de la red.
- Mediante la simulación del *cluster* de la ciudad de Camagüey se determinó que el área efectiva de servicio hay una disminución evidente en cuanto al área del enlace y disminuye la cantidad de celdas a la que un usuario en un mismo lugar puede conectarse. En el caso de la cobertura por nivel de señal no hay una afectación que se pueda percibir por parte de un usuario, esta disminuye en niveles mínimos, por tanto, se mantiene prácticamente igual. El *throughput* es el parámetro más afectado con la

introducción de la tecnología debido a que hay disminuciones más tangibles en un mismo lugar cuando se compara después del cambio de MIMO.

Recomendaciones

Con el objetivo de dar continuación al presente trabajo se plantean las siguientes recomendaciones:

- Ampliar el uso de la herramienta *Atoll* dentro de la carrera.
- Incorporar nuevas prácticas de laboratorio mediante el uso de estas herramientas de simulación.
- Que el presente trabajo sirva como fuente de estudio a estudiantes y profesionales interesados en el planeamiento de redes móviles y el empleo de *Atoll* como simulador de redes móviles.
- Hacer un estudio de factibilidad económica con respecto a la introduccion de la tecnología WTTx en comparacion con la tecnologia ASDL en su utilización para el Nauta Hogar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «Nauta Hogar - EcuRed». https://www.ecured.cu/Nauta_Hogar (accedido 11 de octubre de 2022).
- [2] J. De Vriendt, P. Laine, C. Lerouge, y Xiaofeng Xu, «Mobile network evolution: a revolution on the move», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, n.º 4, pp. 104-111, abr. 2002, doi: 10.1109/35.995858.
- [3] A. S. Fernández y B. T. Ahmed, «TRABAJO FIN DE GRADO», p. 62.
- [4] N. Bhandari, S. Devra, y K. Singh, «Evolution of Cellular Network: From 1G to 5G», vol. 3, n.º 5, p. 8, 2017.
- [5] A. Guerra Guerra, «Optimización de redes móviles concurrentes», PhD Thesis, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería ..., 2021.
- [6] A. Furuskar, S. Mazur, y H. Olofsson, «EDGE: Enhanced Data Rates for GSM and TDMA/736 Evolution», p. 11, 1999.
- [7] A. Pachón, «Evolución de los sistemas móviles celulares GSM», *Sist. Telemática*, vol. 2, n.º 4, pp. 13-45, 2004.
- [8] C. Xenakis, D. Apostolopoulou, A. Panou, y I. Stavrakakis, «A Qualitative Risk Analysis for the GPRS Technology», en *2008 IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*, Shanghai, China, dic. 2008, pp. 61-68. doi: 10.1109/EUC.2008.123.
- [9] A. R. Mishra, *Fundamentals of cellular network planning and optimisation: 2G/2.5 G/3G... evolution to 4G*. John Wiley & Sons, 2004.
- [10] M. R. Bhalla y A. V. Bhalla, «Generations of mobile wireless technology: A survey», *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 5, n.º 4, pp. 26-32, 2010.
- [11] A. Furuskar, S. Mazur, F. Muller, y H. Olofsson, «EDGE: Enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution», *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, n.º 3, pp. 56-66, 1999.
- [12] E. Ezhilarasan y M. Dinakaran, «A review on mobile technologies: 3G, 4G and 5G», en *2017 second international conference on recent trends and challenges in computational models (ICRTCCM)*, 2017, pp. 369-373.
- [13] H. Karjaluoto, «An investigation of third generation (3G) mobile technologies and services», *Contemp. Manag. Res.*, vol. 2, n.º 2, pp. 91-91, 2006.

- [14] F. Gunnarsson y F. Gustafsson, «Control theory aspects of power control in UMTS», *Control Eng. Pract.*, vol. 11, n.º 10, pp. 1113-1125, 2003.
- [15] B. N. B. Vílchez y I. García, «Diseño de una estación base para su integración en una red celular basadas en tecnologías GSM/UMTS». Obtenido de Universidad Nacional De Ingeniería. Recinto Universitario Simón ..., 2014.
- [16] H. Honkasalo, K. Pehkonen, M. T. Nieminen, y A. T. Leino, «WCDMA and WLAN for 3G and beyond», *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 9, n.º 2, pp. 14-18, 2002.
- [17] M. Vollmer, M. Haardt, y J. Gotze, «Comparative study of joint-detection techniques for TD-CDMA based mobile radio systems», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 19, n.º 8, pp. 1461-1475, 2001.
- [18] J. Prokkola, P. H. J. Perala, M. Hanski, y E. Piri, «3G/HSPA Performance in Live Networks from the End User Perspective», en *2009 IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, jun. 2009, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICC.2009.5198575.
- [19] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, y P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Academic Press, 2010.
- [20] S. E. C. LA GENERACIÓN, «USO DE TECNOLOGÍA HSPA (HSPA+) Y SU EVOLUCIÓN CON LA GENERACIÓN DE LOS CELULARES.».
- [21] J. Cao, M. Ma, H. Li, Y. Zhang, y Z. Luo, «A Survey on Security Aspects for LTE and LTE-A Networks», *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 16, n.º 1, pp. 283-302, 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.041513.00174.
- [22] T. Bhandare, «LTE and WiMAX Comparison», *undefined*, 2008, Accedido: 18 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/author/Tejas-Bhandare/70624917>
- [23] C. A. S. Jiménez y F. R. M. Rizo, «Arquitectura general del sistema LTE», *Telemática*, vol. 12, n.º 2, Art. n.º 2, jul. 2013.
- [24] G. Fodor *et al.*, «An Overview of Massive MIMO Technology Components in METIS», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, n.º 6, pp. 155-161, jun. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600802.
- [25] M. D. Bravo, M. A. Sanchez, y G. D. Vargas, «Evaluación de estructuras MIMO sobre tecnología LTE de cuarta generación (4G) de telefonía móvil», *Ing. Región*, n.º 10, pp. 55-66, 2013.
- [26] S. Taruna y I. Kaur, «Performance analysis of MIMO for various antenna configurations», en *2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)*, 2013, pp. 90-93.
- [27] I. Szini, G. F. Pedersen, S. C. Del Barrio, y M. D. Foegelle, «LTE radiated data throughput measurements, adopting MIMO 2x2 reference antennas», en *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, pp. 1-5.

- [28] L. A. Zambrano Vega y C. A. Castillo Arias, «Simulación y optimización de MIMO Systems usando Beamforming a través del Singular Value Decomposition», B.S. thesis, Espol, 2018.
- [29] S. Srikanth, P. Murugesu Pandian, y X. Fernando, «Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, n.º 9, pp. 153-161, sep. 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6295726.
- [30] C. J. Casey, S. Rajagopalan, M. Yan, G. Booker, A. Sprintson, y W. Magnussen, «Supporting Voice over LTE: Solutions, Architectures, and Protocols», en *2013 22nd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Nassau, Bahamas, jul. 2013, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICCCN.2013.6614200.
- [31] S. Vittal, «Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC) with LTE», *Radisys White Pap.*, pp. 1-10, 2011.
- [32] «Circuit Switch Fallback Improvement and the Smarter Way for Implementation | Elsevier Enhanced Reader». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212671613000048?token=76D57D028AA58DCF79948C17E333A9C7A1DB1A83FECB53C6D51B3650389E9AE648132C268B6DB18CE385EA8CC940B77F&originRegion=us-east-1&originCreation=20221019201216> (accedido 19 de octubre de 2022).
- [33] A. Hikmaturokhman, L. S. Palupi, N. Amalia, A. R. Danisya, y T. A. Nugraha, «4G LTE Evolved Packet Core Planning with Call Switch Fallback Technology», vol. 10, n.º 1, p. 4.
- [34] R.-H. Liou, Y.-B. Lin, Y. C. Sung, P.-C. Liu, y C. Wietfeld, «Performance of CS Fallback for Long Term Evolution Mobile Network», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, n.º 8, pp. 3977-3984, oct. 2014, doi: 10.1109/TVT.2014.2302832.
- [35] J. Wannstrom, «LTE-advanced», *Third Gener. Partnersh. Proj. 3GPP*, 2013.
- [36] R. Ratasuk, D. Tolli, y A. Ghosh, «Carrier Aggregation in LTE-Advanced», en *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 1-5. doi: 10.1109/VETECS.2010.5493902.
- [37] «Huawei WTTx Wins 2018 ITU Global Corporate Award: Sustainable Development», *huawei*. <https://www.huawei.com/en/news/2018/9/wttx--itu-global-corporate-award> (accedido 8 de noviembre de 2022).
- [38] R. Flamini, C. Mazzucco, R. Lombardi, C. Massagrande, F. Morgia, y A. Milani, «Millimeter-wave phased arrays for 5G: An industry view on current issues and challenges», en *2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, oct. 2019, pp. 1-2. doi: 10.1109/PAST43306.2019.9020827.
- [39] «WTTx». <https://carrier.huawei.com/en/products/wireless-network/lte/wttx> (accedido 21 de octubre de 2022).
- [40] «Sprinting the last mile with WTTx - Huawei Publications», *huawei*. <https://www.huawei.com/en/technology-insights/publications/huawei-tech/80/sprinting-the-last-mile-with-wttx> (accedido 8 de noviembre de 2022).

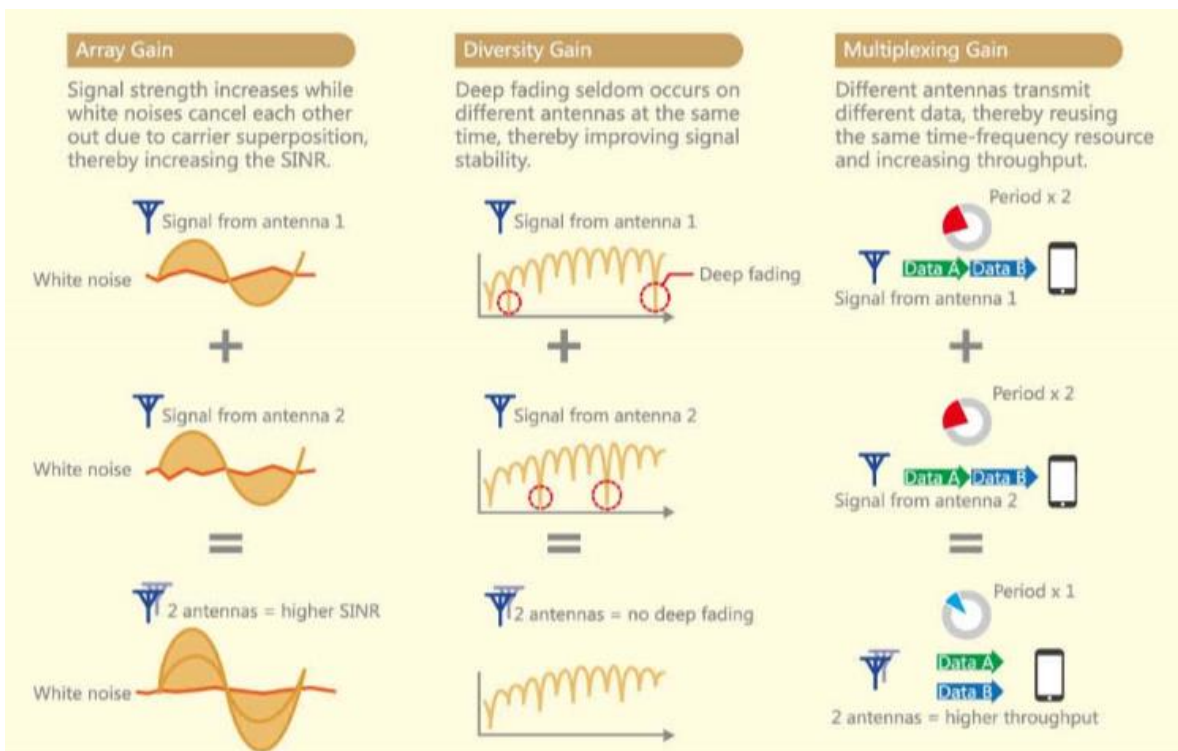
- [41] F. Gordejuela-Sanchez y J. Zhang, «LTE access network planning and optimization: A service-oriented and technology-specific perspective», en *GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, 2009, pp. 1-5.
- [42] T. Halonen, J. Romero, y J. Melero, *GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS*. John Wiley & Sons, 2004.
- [43] J. Lempiäinen y M. Manninen, *Radio interface system planning for GSM/GPRS/UMTS*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [44] L. Song y J. Shen, *Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE*. CRC press, 2010.
- [45] J. Á. F. Segovia, S. L. Ramírez, y M. T. Genovés, «Algoritmos de planificación del control de potencia y estimación de capacidad en redes LTE», PhD Thesis, MS thesis, Faculty of the Escuela Técnica Superior de Ingeniería de ..., 2015.
- [46] «3GPP_LTE_Advanced_Standard.pdf». Accedido: 19 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://data.kommago.nl/img/upload/shopimage/mobielverbinden/3GPP_LTE_Advanced_Standard.pdf
- [47] J. Ramiro y K. Hamied, *Self-organizing networks: self-planning, self-optimization and self-healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley & Sons, 2011.
- [48] S. I. Herrera, P. J. Najar Ruíz, S. H. Rocabado Moreno, M. C. Fénema, y M. C. Cianferoni, «Optimización de la Calidad de los Sistemas Móviles», en *XV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2013.
- [49] F. Krasniqi, L. Gavrilovska, y A. Maraj, «The analysis of key performance indicators (KPI) in 4G/LTE networks», en *International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*, 2019, pp. 285-296.
- [50] «Alfredo Abel Perez.pdf». Accedido: 21 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/659/Alfredo%20Abel%20Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [51] V. Osa Ginés, «Planificación y Optimización Automática de Redes Móviles LTE», Universitat Politècnica de Valencia, 2013.
- [52] «Netmonitor - Apps en Google Play». https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parizene.netmonitor&hl=es_419&gl=CU (accedido 23 de octubre de 2022).
- [53] S. Grau Mompó, «Medición y Análisis de las Redes de Comunicaciones Móviles 4G LTE en Cullera», PhD Thesis, Universitat Politècnica de València, 2019.
- [54] «NetMonster - Aplicaciones en Google Play». <https://play.google.com/store/apps/details?id=cz.mroczis.netmonster&hl=es&gl=US> (accedido 24 de octubre de 2022).
- [55] «Home». <https://netmonster.app/> (accedido 26 de octubre de 2022).

ANEXOS

Anexo 1: Diferencias entre las diferentes tecnologías para brindar servicio de voz en LTE

| | SVLTE | CS Fallback | VoLTE |
|--------------------------------|---------------|--|--|
| UE requirement | Dual-radio UE | Dual-mode UE | Dual-mode UE |
| UE power consumption | High | Low | Low |
| Concurrent voice+data services | Supported | Supported, with support of DTM required | Supported |
| Call setup time | Short | Long | Short |
| Network reconstruction | No | Partial reconstruction of the core network | Partial reconstruction of the core network and introduction of IMS |

Anexo 2: Beneficios de MIMO



Anexo 3: Características de las diferentes redes celulares

| | 2.5G | | 3G | | 3.5G | | 4G |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
| | EDGE | cdma2000 | UMTS ¹ | EV-DO ² | HSDPA | EV-DV | LTE |
| Channel bandwidth (MHz) | 0.2 | 1.25 | 5 | 1.25 | 5, 10 | 1.25, 3.75 | 5, 10, 15, 20 |
| Duplexing | FDD | FDD | FDD | FDD | FDD | FDD | FDD/TDD |
| Multiplexing | TDMA | TDMA | WCDMA | TD-CDMA | WCDMA | TD-CDMA | OFDM/SCFDMA |
| Modulation | GMSK/8PSK | GMSK/8PSK | QPSK | QPSK/8PSK/16QAM | QPSK/16QAM/ | QPSK/8PSK/16QAM | QPSK/16QAM/64QAM |
| Coding | C | CTC | CTC | CTC | CTC | CTC | CTC |
| Maximum data rate (Mbps) | (UL) 0.04 (DL) 0.18 | (UL) 0.05 (DL) 0.38 | (UL) 0.14 (DL) 0.38 | (UL) 1.8 (DL) 3.1 | (UL) 2 (DL) 7.2 | (UL) 1 (DL) 3-5 | (UL) 50 (DL) 100 ³ |

Anexo 4: Evolución de las generaciones de la telefonía móvil

