



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



Propuesta de transición hacia la cuarta generación de telefonía móvil en Santo Tomé y Príncipe

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Autor: Gelson Alves Francisco Nunes

Tutor: MSc. David Beltrán Casanova

Santa Clara

Abril de 2014

“Año 56 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

**Propuesta de transición hacia la cuarta generación
de telefonía móvil en Santo Tomé y Príncipe**

Autor: Gelson Alves Francisco Nunes

galves2009@live.com

Tutor: MSc. David Beltrán Casanova

dbeltranc@uclv.edu.cu

Santa Clara

Abril de 2014

“Año 56 de la Revolución”



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

Firma del Autor

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

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“640 Kilobytes de memoria RAM deben ser suficientes para cualquiera”.

Bill Gates. Microsoft 1981.

DEDICATORIAS

*Le dedico este trabajo a mi abuela, quién ha
asumido las funcionalidades de paternidad y
maternidad mía desde muy temprana edad.*

AGRADECIMIENTOS

Aunque utilizara todas las palabras del mundo no sería suficiente para manifestar me grado de satisfacción y agradecimiento a todos cuantos hicieron posible la materialización de este gran sueño. Por mencionar algunos nombres a título de ejemplo, no puedo dejar citar nombres como: Dr. Félix Álvarez Paliza, David Beltrán, Juan Pablo Barrios, Glenda Melissa, Híronidina Nunes, Juka Sachípia, Sílvio Nunes, María Francisca, Juvenal Armando y Fábio Viana, mis agradecimientos son extensivos a todos que de una forma u otra aportaron su colaboración y no fueron citados, les agradezco a todos.

Resumen

La presente disertación cuenta con una panorámica geográfica de la localización de Santo Tomé y Príncipe desde una perspectiva climática, ambiental, relieve y de la densidad poblacional. Se hace énfasis en la descripción los sistemas de telefonía móvil instalada y la propuesta de mejora de éste a partir de la implementación de la cuarta generación de telefonía móvil que se pretende desplegar a corto plazo, detallando los principales aspectos que diferencian ambas generaciones. Los motivos que impulsan la transición de tercera hacia la cuarta generación de los sistemas móviles. Aparejado con la implementación de banda ancha móvil son mencionados la relación costo beneficio, y presentadas distintas propuestas de soluciones para la transición, culminando con la evaluación mediante simulación en el software Atoll de la propuesta planteada.

Abstract

In this dissertation the general geographical location of Sao Tome and Principe is discussed from different point of views; from the climatic, ambiental and relieve pespective as well as the population density. It's mostly emphasized in Mobile Telephone Systems installed and the 4th generation proposed with the aim of improving the actual System, employing the implementation of the 4th generation of the mobile telephone being employed in short term evolution emphasizing the principal aspects differentiating both generations. Besides the implementation of the band width, diffrest proposals are mentioned as solutions for the transition, culminating with the evaluation via simulations using Atoll Software for the previous proposal.

ÍNDICE

Resumen.....	i
Abstract	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: CARACTERIZACIÓN DE LA RED Y LAS TECNOLOGIAS IMPLEMENTADAS EN LA ACTUALIDAD EN SANTO TOMÉ Y PRÍNCIPE.	5
1.1 Localización geográfica y población.....	5
1.2 Descripción del estado actual de las comunicaciones móviles en STP.....	6
1.3 Evolución de las tecnologías en las comunicaciones móviles.....	7
1.4 Tercera generación de la telefonía móvil.	9
1.4.1 Tecnología de Múltiple Acceso por División de Código de Banda Ancha-WCDMA 12	
1.4.2 Red de Acceso de Radio-RAN	13
1.5 STP desde una perspectiva mundial.....	13
1.6 Cumbre Conectar África	14
1.7 Red de transporte en los sistemas celulares.....	16
1.7.1 <i>Carrier Ethernet</i> como tecnología de transporte.....	17
1.7.2 Ethernet Óptica convergente.	17
1.7.3 <i>Backhaul</i> móvil	18
1.7.4 <i>Carrier Ethernet</i> para <i>backhaul</i> móvil	19
CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA NUEVA GENERACIÓN.....	21
2. <i>Long Term Evolution</i> (LTE).....	21
2.1. Arquitectura de LTE.....	22
2.2. Evolved Packet Core (EPC)	23
2.3. Evolved Node B (eNB)	24
2.4. Técnicas de acceso múltiple	25
2.4.1. Multiplexación Ortogonal por División de Frecuencia-OFDM	25
2.4.2. Técnica de acceso para enlace descendente.	26
2.4.3. Asignación dinámica del enlace	29
2.4.4. Gestión de Recursos de Radio.....	33
2.5. Balance de carga.....	34
2.6. <i>Scheduling</i> de paquetes	36

2.7.	Inter-Cell Interference Coordination (ICIC)	39
2.7.1.	Control de movilidad.....	39
2.7.2.	Flexibilidad del espectro radioeléctrico	40
2.8.	Despliegue de LTE en el mundo	40
CAPÍTULO III: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE LTE		42
3.1	Heterogeneidad en las redes	42
3.2	Propuestas de solución	42
3.3	Solución para la unidad de radio	44
3.4	Propuesta de solución para la unidad digital	45
3.5	Solución mediante utilización de interfaces propias de los sistemas.	46
3.6	Solución mediante la incorporación de nuevas interfaces.....	48
3.7	Solución de transición propuesta por HUAWEI	50
3.8	Propuesta de solución del fabricante Ericsson	53
3.9	Implementación de las propuestas mediante simulación con <i>Atoll</i>	55
3.10	Software <i>Atoll</i>	55
3.11	Algoritmo de diseño de una red LTE	56
3.12	Configuración de los parámetros.....	57
3.13	Parámetros de diseño de la red.....	58
3.14	Solapamiento e interferencia de las señales.	63
3.15	Asignación de transmisores vecinos.....	65
3.16	Planificación automática de frecuencia.	66
3.17	Planificación del <i>Physical Cell ID</i>	66
3.18	Análisis de señales y cálculos de predicciones.	67
3.19	Evaluación económica de la propuesta.	72
3.20	Elección de las soluciones propuestas.....	72
Conclusiones		74
Bibliografía		77
Anexos A.....		79

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de servicios de Internet a escala mundial, ha generado la necesidad de construir redes que tengan capacidad de manejar el creciente tráfico, y que, además sean más robustas, fiables, sencillas y escalables. Santo Tomé y Príncipe (STP) se encuentra inmerso en una revolución tecnológica e informática con el objetivo de llevar a cabo la informatización tanto en los sectores estatales como en el sector privado, de forma general. Este es un proceso mediante el cual se prevé la aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en las diferentes esferas de la sociedad para lograr la optimización de los recursos.

Para que la sociedad responda de manera eficiente y competitiva, se debe aplicar la informatización en todas sus esferas y procesos, aumentando así la preparación cultural, científica y técnica del pueblo para poder enfrentar las dificultades existentes en cuanto al uso de las tecnologías de información. Para la aplicación de las TIC se requieren redes de transporte que proporcionen gran ancho de banda y grandes capacidades de transmisión, así como redes que garanticen el flujo de toda la información, generada por los usuarios, a cualquier parte del territorio nacional e internacional con una óptima calidad y rapidez. En el presente trabajo centra su objetivo principalmente en las redes de banda ancha de Próxima Generación (MNGN-*Mobile Next Generation Network*) en la modalidad inalámbrica a ofertar por operadores de servicios móviles.

El creciente desarrollo de los servicios móviles en el mundo impulsa a que Santo Tomé no se quede al margen, por la importancia que estos brindan como medio efectivo de comunicación masiva en constante despliegue, por ello es necesario pensar en soluciones encaminadas a su utilización más eficiente. Esto revierte en una mayor preparación para enfrentar las futuras evoluciones de los mismos. No obstante a eso, la necesidad de un despliegue de las comunicaciones en las áreas rurales, determinada por necesidades económicas y sociales, principalmente aquellas destinadas a la educación y a la medicina a distancia son un hecho y es esta la dirección principal hacia donde se deben dirigir las soluciones en el campo de las comunicaciones. Debido a que, en las tecnologías inalámbricas los usuarios no están atados físicamente a ninguna infraestructura, eso la hace idónea en comparación con otras tecnologías competidoras o

incluso complementarias. Son las más adecuadas para dar una solución real a estas necesidades. En particular, la tecnología de los servicios móviles juega un papel fundamental para dar solución a las demandas de servicios en la educación y la medicina, por citar algunas ramas de servicios fundamentales en la sociedad. En la medida que el despliegue y el acceso a Internet se incrementen con el propósito de que estos servicios lleguen a todas las localidades del país, es necesaria la transmisión, principalmente de contenido multimedia, lo que requiere de un mayor ancho de banda del que se dispone. Ante esta problemática alude la necesidad de una evolución de los servicios móviles hacia tecnologías con anchos de banda superiores llamados banda ancha, como una de las soluciones viables y que implica evolución hacia otras generaciones en tecnología de telefonía móvil. Por tanto, la expansión de la red de servicios móviles con el objetivo de cumplir los nuevos requerimientos de ancho de banda, representa un incremento significativo del costo OPEX (*Operational Expansive*) asociado principalmente al *Backhaul* (Redes de Retorno).

Por otro lado, hay otros aspectos a considerar, no relacionados con costos como son las nuevas funcionalidades que deben ser introducidas para responder al tráfico generado por los nuevos servicios y que incluyen gestión tanto de calidad de servicio (QoS) como de resiliencia, lo que sugiere el tránsito hacia redes de conmutación de paquetes en la variante de red todo IP. Además, las redes contenidas en el *backhaul* deben soportar numerosas generaciones de tecnologías simultáneamente, lo que hace necesaria la protección de las inversiones de las tecnologías existentes por varios años conjuntamente con una estrategia para la introducción de futuras tecnologías tanto de acceso como de redes.

La infraestructura instalada actualmente en Santo Tomé se corresponde a la 3G (Tercera Generación), en su variante UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), con una mejora en la tecnología de transmisión mediante el acceso HSPA (*Hight Speed Paquet Access*). El acceso se realiza mediante redes PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) y SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) y el transporte mediante redes ópticas y de radio territorial y nacional. La red de transporte nacional está soportada con tecnologías del fabricante noruego NSN (*Nokia Siemens Network*), mientras el *backbone* de fibra óptica es Lucent-Alcatel.

En estas condiciones, las redes están aptas para brindar algunos servicios y contenido de internet y multimedia hasta donde la capacidad que brinda la tecnología en uso lo permita; además no existe una oferta considerable de este servicio ni de aplicaciones de multimedia. Las redes inalámbricas existentes, aparte de obsoletas, no tienen capacidad suficiente en cuanto a ancho de banda y razón de transmisión de datos.

Esta problemática sugiere la evolución de los servicios móviles hacia tecnologías con anchos de banda superiores, convergentes y principalmente que este capacitada para soportar tecnologías futuras.

De forma resumida la nueva infraestructura del *backhaul* de red de servicio móvil debe cumplir con los siguientes requisitos para hacerle frente a las demandas futuras.

- Debe ser flexible de modo que soporte tanto los servicios tradicionales como los basados en IP.
- Ser escalable para que soporte las nuevas tecnologías en evolución.
- Debe ser una red convergente de manera que los operadores no tengan la necesidad de operar dos redes por separado.
- Poseer una relación Costo-Rendimiento aceptable, para compensar los gastos demandados por el incremento de tráfico.

De este trabajo investigativo resulta la siguiente interrogante:

¿Qué variante tecnológica sería más factible para una transición eficiente hacia la cuarta generación y a la vez compatible con los estándares predecesores instalados en la red móvil en Santo Tomé?

A modo de respuesta a esta interrogante se pretende arribar a posible resultado:

Presentar la propuesta de diseño de una solución compatible con los estándares anteriores, que sea económicamente factible y posibilite incrementar los servicios y aplicaciones acorde a las capacidades de los terminales más sofisticados. Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, se relacionan a continuación los objetivos a alcanzar.

Como **objetivo general** se declara proponer una infraestructura de red que soporte la banda ancha móvil de cuarta generación en Santo Tomé y Príncipe.

Para su cumplimiento se formulan los siguientes **objetivos específicos**:

- Caracterizar el estado actual de la red celular implementada en Santo Tomé.
- Describir las tecnologías de telefonía móvil de cuarta generación.
- Diseñar la propuesta de la infraestructura de la red de cuarta generación para Santo Tomé.
- Evaluar la infraestructura propuesta mediante simulación.

Con esta información se conformó el marco teórico de la solución que se propone. Durante la evaluación de la propuesta se empleó el método criterio de especialistas con el propósito de valorar la pertinencia de la propuesta. Como implicaciones prácticas se logra una mejor eficiencia y calidad en los servicios ofertados, aumentando las capacidades de ancho de banda, velocidades de transmisión y fiabilidad en la red. El resultado de este trabajo posee una aplicación práctica y teórica de gran trascendencia para los especialistas, investigadores y diseñadores de la esfera de telecomunicaciones. Los resultados del mismo se aplican fundamentalmente en la esfera técnica donde se ganará en calidad de los servicios, organización y ahorro de recursos, también en el de capacitación y metodología pues servirá de guía para futuros trabajos que haya que realizar en la modernización y expansión de esta y otras redes de telecomunicaciones.

Organización del informe

La estructura del siguiente trabajo de investigación consiste en Resumen, Introducción, Capitularios, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía, Anexos y Glosario de términos. El Capitulario consta de tres capítulos agrupados en epígrafes. En el primer capítulo se enfoca en los aspectos relacionados con la ubicación geográfica del país y la infraestructura de telecomunicaciones desplegada. El capítulo siguiente hace una descripción del estándar propuesto para ser implementado, haciendo énfasis en las compatibilidades e interoperabilidad con el estándar predecesor. Por último, en el tercer capítulo se hace el estudio de posibles soluciones que culmina con la propuesta y evaluación de la misma mediante simulación con el *software* Atoll.

CAPÍTULO I: CARACTERIZACIÓN DE LA RED Y LAS TECNOLOGIAS IMPLEMENTADAS EN LA ACTUALIDAD EN SANTO TOMÉ Y PRÍNCIPE.

1.1 Localización geográfica y población.

La República Democrática de Santo Tomé y Príncipe (STP) es un país-archipiélago formado por las islas de Santo Tomé y la de Príncipe ubicado en el golfo de Guinea en la costa occidental del continente africano distancia do a 380 km del mismo. La superficie terrestre de las islas es de 1001 km² distribuida en 859 km² y 142 km² cada una respectivamente y con una distancia de 145 km entre ambas. El archipiélago ha surgido de actividades volcánicas relativamente antiguas (dos millones de años), posee relieve accidentado con picos que alcanzan más de 1.500 metros de altitud con el punto más elevado ubicado a 2024 m por encima de nivel del mar.[1]



Figura- 1-Localización geográfica de Santo Tomé y Príncipe.[1]

La pluviometría media anual es de 2000 mm a 3000 mm por año, pudiendo llegar hasta los 7000 mm en las florestas de neblina. El clima es tropical húmedo con una

temperatura media anual de 26°C, las estaciones están divididas en dos; una caliente y lluviosa, que dura 9 meses y la otra que dura 3 meses y es relativamente de sequía. El país tiene una población de aproximadamente 180 mil habitantes distribuida en siete distritos con mayor incidencia poblacional en la capital (Santo Tomé) con 53.300 habitantes, distrito de Agua Grande y en el distrito de Pagué en la isla de Príncipe con 8.000 habitantes conformando una densidad poblacional de aproximadamente 190 hab/km² y la población rural constituye un 60%.[1]

1.2 Descripción del estado actual de las comunicaciones móviles en STP.

A principio de los años 2000 empezaron los primeros pasos en la introducción de los sistemas de telefonía móvil en las islas por parte de la operadora CST, Compañía Santomense de Telecomunicaciones – SARL, una empresa mixta, en la forma de Sociedad Anónima de Responsabilidad Limitada, que fue fundada en el mes de enero del año 1990. La empresa tiene un 49% de capital nacional distribuida en los productos, servicios y capital humano, de la parte extranjera su principal inversionista es la operadora portuguesa PT-Portugal Telecom y la mayor inversión va está direccionada en el fortalecimiento y mantención de equipos y formación de los profesionales.

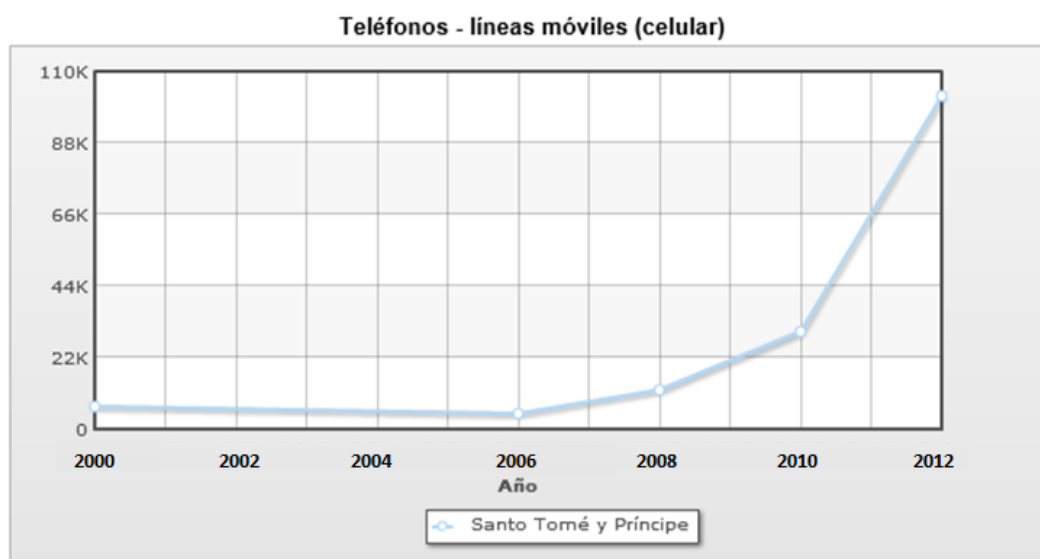


Figura- 2-Tasa de crecimiento de abonados de servicio móvil.[2]

Tiene como misión, crear puentes, acercar personas, canalizar informaciones, valores y conocimiento. Tiene en vista para un futuro no muy lejano, consolidar y liderar una industria nacional de info-comunicaciones y constituir una referencia africana en la construcción de la sociedad de la información y del conocimiento. Inicialmente comenzó con el sistema básico de GSM que progresivamente se fue modernizando hasta que llegó a UMTS de la tercera generación.

1.3 Evolución de las tecnologías en las comunicaciones móviles.

El término “comunicaciones móviles” describe cualquier radio-enlace para la comunicación entre dos terminales, del cual uno o ambos están en movimiento o detenidos en ubicaciones indeterminadas. Lo anterior se aplica tanto a las comunicaciones de móvil a móvil como a las de móvil a fijo. Primera generación (1G) aparece a fines de los años 70 en Estados Unidos a comienzo de los 80 en Europa, caracterizándose por ser una tecnología analógica, basada en FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) y estrictamente para servicios de voz. Los sistemas 1G se basaban principalmente en los sistemas: AMPS (*Advanced Mobile Phone Service/System*) (USA), NMT (*Nordic Mobile Telephone*) y TACS (*Total Access Cellular System*) (Europa) y a pesar de que estos eran incompatibles, compartían características notables entre las mismas.[3]

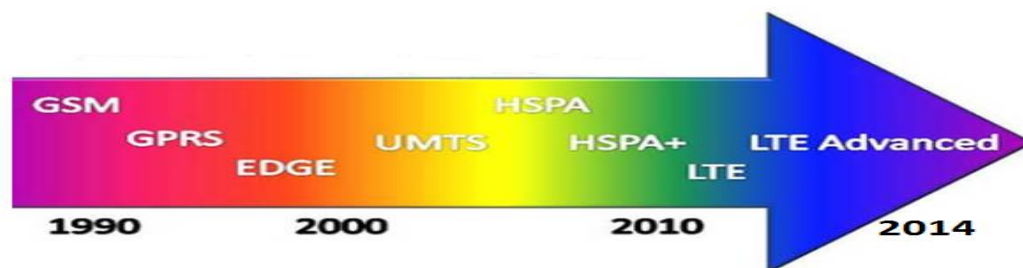


Figura- 3-Evolución de los sistemas móviles

La segunda generación de comunicaciones móviles fue introducida al mercado en los años 1990 y la industria de la telefonía celular evolucionó hacia una segunda generación (2G). La 2G se caracterizó por ser digital, por lo cual aparecen nuevos servicios tales como el identificador de llamada, conferencia tripartita, transferencia de datos a baja velocidad y el envío de mensajes cortos (SMS-*Short Message Service*). En esta generación aparecen dos técnicas de acceso contendientes. Por un lado, el TDMA (*Time Division Multiple Access*) y por el otro CDMA (*Code Division Multiple Access*). En

Europa aparece una tecnología basada en TDMA, conocida como GSM (*Global System for Mobile Communications*), empezando así una movilización de tecnologías alrededor del mundo. Con el objetivo de proporcionar caudales mayores, se definieron varias extensiones a los sistemas 2G, dando lugar a lo que se designó como sistemas 2.5G. En el caso de GSM, dichas extensiones son HSCSD (*High-Speed Circuit-Switched Data*), GPRS (*General Packet Radio Service*) y EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*).

Tercera generación surge a finales de los 90, las prestaciones de los sistemas 2G y de sus extensiones se escaseaban ante la creciente demanda de mayores caudales para el acceso a *internet* y el soporte de servicios avanzados, especialmente los multimedia. La respuesta fue el desarrollo de los sistemas de tercera generación (3G) UMTS y CDMA2000. Las redes UMTS se basan en un conjunto inicial de especificaciones del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) denominado *Release 99*. [3] Debido a las limitaciones de esta primera versión del estándar UMTS, en los últimos años los operadores se han acelerado en introducir ciertas mejoras previstas para versiones posteriores. Se trata de las tecnologías HSPA (*High Speed Packet Access*), en las que se agrupan un conjunto de extensiones al interfaz radio UMTS original encaminadas a mejorar las prestaciones tanto en sentido descendente, caso de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), como ascendente, mediante HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). Los documentos del 3GPP se estructuran en *Releases*, cada una de ellas caracterizada por la incorporación de un conjunto de funcionalidades destacadas en relación a la versión anterior. Así, la que se llamó R99 supuso el primer conjunto de especificaciones UMTS. Seguidamente, tras la llamada R4, se completó en marzo de 2002 la R5 que incluye por ejemplo HSDPA. Tres años después se incorpora HSUPA así como MBMS en R6. En la R7 (septiembre de 2007) se incluye HSPA+, mientras que LTE (*Long Term Evolution*) se asocia ya a R8 y posteriores. Con ellas se posibilita alcanzar valores teóricos de hasta 14,4 Mbps en bajada y 5,7 Mbps en subida. Con la implantación de las tecnologías HSPA se produce la entrada de los sistemas de comunicaciones móviles 3.5G. La evolución no termina ahí y los operadores ya se preparaban para la introducción de nuevas extensiones como HSDPA Evolucionado (también conocida como HSDPA+). [3]

En la cuarta generación los sistemas buscan la convergencia de varias tecnologías inalámbricas existentes con las tecnologías celulares de 3G, además de un manejo más eficiente del espectro a través de una técnica de acceso al medio como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Promete velocidades del orden de cientos de Mbps, mecanismos de calidad de servicio y uso transparente de las tecnologías inalámbricas para el usuario. A nivel de aplicación, el concepto de telefonía móvil tiende a desaparecer pues permitiría el desarrollo de aplicaciones que integren voz, imagen y datos, simultáneamente.

1.4 Tercera generación de la telefonía móvil.

UMTS es el estándar de la tecnología de telefonía móvil de tercera generación desarrollada por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), una organización que cumple con las especificaciones del estándar IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*) de la UIT (Unión Internacional de las Telecomunicaciones) para lograr la compatibilidad mundial entre redes 3G. El sistema UMTS surge ante las crecientes demandas de mayores velocidades para el acceso a *Internet* y el soporte de servicios avanzados de multimedia, que no podían satisfacer las comunicaciones móviles de 2G. Su principal competidor es la versión norteamericana CDMA-2000 (*Code Division Multiple Access- 2000*). A finales de la década de 1990 se desarrollaron los sistemas de tercera generación UMTS y CDMA- 2000, superando en términos de prestaciones y capacidad a sus antecesores.[4] Entre las mejoras ofrecidas por las redes UMTS se destacan: acceso a *Internet*, servicios de banda ancha, *roaming* internacional e interoperabilidad. Pero la principal característica es la introducción de servicios de multimedia como la videoconferencia y video llamada. La estructura de una red UMTS está formada por la red de acceso radio (UTRAN, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y el núcleo de red (CN-*Core Network*), como se ilustra en la figura 4.

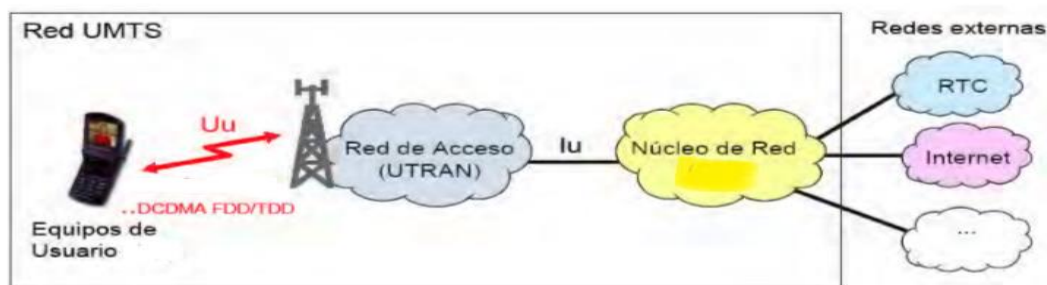


Figura- 4-Componentes de una red UMTS.[4]

El núcleo de red CN se encarga de la conmutación, enrutamiento y tránsito para el tráfico de los datos de los usuarios, permitiendo la conexión a las redes externas. La estructura básica de una CN está formada por los dominios de conmutación de circuitos (CS) y conmutación de paquetes (PS), cuyos elementos se conectan a la red de acceso mediante la interfaz radio **Iu**. La red de acceso UTRAN está constituida por controladores RNC (*Radio Network Controller*) y varios Nodos-B asociados a cada uno de ellos. Los Nodos-B son los elementos que se corresponden con las estaciones bases y dan cobertura a un área geográfica determinada o célula. Para el enlace entre diferentes RNCs se utiliza la interfaz **Iur**, y entre el RNC y los Nodos-B la interfaz **Iub**. Los equipos terminales UMTS pueden ser teléfonos móviles o terminales equipados con el módulo de identidad de usuario SIM (*Subscriber Identity Module*) que consiste en una tarjeta extraíble con datos y procedimientos para identificar al usuario en la red. El acceso a la red UTRAN se realiza utilizando la tecnología WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) en su variante DS-CDMA (*Direct Sequence CDMA*) con un par de canales con portadoras de 5 MHz, uno en el rango de 1885–2025 MHz para el enlace de subida y uno en el rango de 2110–2200 MHz para el de bajada y alcanzando hasta 2 Mbps.[4]

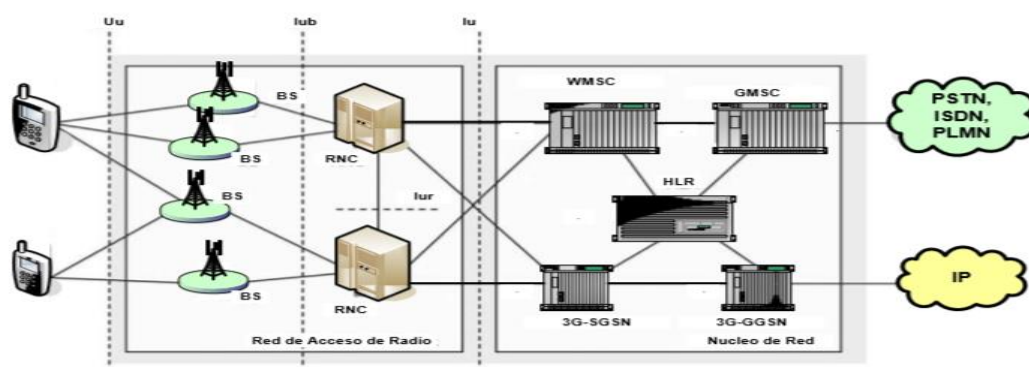


Figura- 5-Elementos e interfaces presentes en la red UMTS.[4]

Soporta enlaces ascendentes y descendentes sobre una única portadora (TDD) o dos (FDD). Las células UMTS presentan distintos tamaños según los diferentes ámbitos de cobertura (rural, urbano, exteriores e interiores). Las configuraciones van desde la picocélula, con radios de cobertura entre 20 y 100 m, hasta la macrocélula, cuyo alcance varía entre 1 y 30 km. Con el objetivo de introducir mejoras al estándar UMTS el 3GPP ha desarrollado diferentes *Releases*: HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) y HSPA + (*Evolved HSPA*). HSDPA permite ampliar la capacidad de transferencia hasta 14.4 Mbps en el canal descendente, gracias al empleo de un nuevo canal de transporte compartido HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*).[5] Esta tecnología introduce nuevas funciones al Nodo-B como: un mecanismo de planificación rápida de paquetes con la utilización intervalos de tiempo de transmisión reducidos (2ms), el empleo de modulación y codificación adaptativa (AMC) y un esquema de retransmisiones híbrido (H-ARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*,) entre terminal y Nodo-B para la retransmisión rápida de paquetes recibidos de forma errónea. HSUPA (*Release 6*) por su parte introduce mejoras en el sentido ascendente utilizando un nuevo tipo de canal dedicado denominado E-DCH (*Enhanced Dedicated Channel*). De esta forma se alcanzan velocidades de transmisión hasta 5,76 Mbps. Esta tecnología al igual que HSDPA utiliza tramas de 2ms y el mecanismo H-ARQ. Las especificaciones *Release 7* y *Release 8* introducen mejoras a HSPA con el empleo de tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). En *Release 7*, usando arreglos de 2x2 MIMO, se logran 28 Mbps en bajada y 11 Mbps en subida con 16QAM en ambos sentidos. Mientras que *Release 8* permite descargas a 42 Mbps con 64QAM y 11 Mbps en subida con 16QAM.[6] La tecnología pretende alcanzar incluso los 84 Mbps en descarga. Los servicios de tercera generación presentan diversas mejoras con respecto a las generaciones anteriores de telefonía celular como son el acceso móvil a *Internet* a velocidades elevadas, servicios de alta interactividad y especialmente, servicios avanzados de multimedia.

1.4.1 Tecnología de Múltiple Acceso por División de Código de Banda Ancha-WCDMA

Este es un sistema del tipo DS-CDMA o sea, CDMA de Secuencia Directa. Esta tecnología permite acceso múltiple basado en espectro extendido. Lo que significa que los bits de información del usuario están dispersos sobre un ancho de banda amplio mediante la proliferación de la información de usuario con bits cuasi-aleatorios llamados chips derivados de los códigos de dispersión CDMA. La razón a la que los datos son dispersados se denomina razón de chip. El terminal móvil de destino utiliza el mismo código de dispersión que aquel usado en el punto de transmisión y lleva a cabo detección de correlación. Cada usuario es identificado por un código de dispersión único asignado a él. La razón de chip usada es de 3.84 Mcps, la que da lugar a un ancho de banda de la portadora de 5 MHz.[7] Esta tecnología incorpora una serie de nuevas funciones esenciales y necesarias para el control de la red que son:

- Control de potencia: Mediante lo cual se regula la potencia transmitida tanto por el terminal como la estación base. Esta función mejora la cobertura y el nivel de interferencia en la red y da lugar a un fenómeno mediante el cual aparece un compromiso dinámico entre capacidad y cobertura que es equivalente a que el tamaño de la celda varíe en dependencia del tráfico.
- Transferencia de celdas entre sistemas: Se realiza entre sistemas WCDMA y GSM y tiene ventajas de acuerdo a la dirección desde donde se requiera. Si es desde WCDMA a GSM esta posibilidad brinda mayor cobertura al usuario ya que cuando un usuario se mueve fuera del área de cobertura WCDMA, la transferencia sobre GSM conduce a mantener la conexión. El proceso en el sentido inverso trae efectos positivos en cuanto a capacidad ya que permite compartir la carga del sistema GSM con el WCDMA, cuando el número de suscriptores en el primero está cerca de su capacidad límite en un área.
- Conmutación del tipo de canal: WCDMA transporta los datos en dos tipos de canales dedicados, que se utilizan cuando se requiere transmitir mucha información con una utilización eficientemente de los recursos de radio y los comunes con menor eficiencia espectral pero con retardo reducido para cuando muchos suscriptores desean compartir el mismo recurso. Esta modalidad permite mover los

suscriptores entre estos canales en dependencia de cuanta información necesitan transmitir.

Control de admisión y congestión: estas funcionalidades se utiliza para evitar sobrecarga del sistema, admitiendo o bloqueando al suscriptor en dependencia del estado de carga del sistema evitando por consiguiente la congestión del producido por el movimiento de los suscriptores de un área a otra y los resultados se logran mediante reducción de la tasa de transmisión y de aplicaciones en tiempo real.

1.4.2 Red de Acceso de Radio-RAN

La arquitectura generalizada de esta red se compone de dos nodos:

- La estación base, denominada Nodo B y donde se define como **Uu** a la interface de aire correspondiente. Esta es gestionada por el Controlador de la Red de Radio (RNC) a través de la interface **Iub**.
- El Controlador de la Red de Radio, que es el nodo que controla todas las funciones de la Red de Acceso de Radio. Este conecta la RAN con el núcleo de la red a través de la interface **Iu**. El RNC desempeña dos papeles, el de servicio y el de control. El RNC de servicio tiene control completo de los dispositivos que están conectados a la RAN, controlando la conexión en la interface **Iu** para el dispositivo móvil y da terminación a varios protocolos en el contacto entre el móvil y la RAN. Por su parte, el RNC de control posee el control completo de un grupo particular de celdas y sus estaciones base asociadas.

Los requerimientos entre controladores de servicio y control se realizan a través del interfaz **Iur** que los conecta.[8]

1.5 STP desde una perspectiva mundial.

Mencionado anteriormente en la introducción de este trabajo, las islas de STP se encuentran sumergidas en una gran revolución tecnológica impulsada por el despliegue del enlace por fibra óptica a nivel de toda la costa africana.

La UIT ha destacado repetidamente la importancia que tiene la banda ancha para el desarrollo. Muchas de las aplicaciones y servicios eficaces que pueden impulsar el desarrollo, por ejemplo, el comercio electrónico, la administración electrónica y la banca sólo

están disponibles mediante conexiones de *Internet* de alta velocidad, pero la tasa de penetración de la banda ancha es baja en toda África que cuenta únicamente con 635.000 abonados fijos de banda ancha en 2009, de acuerdo con el último Informe de la UIT “Perfiles estadísticos de la sociedad de la información: África”. [9]

En una economía mundial cada vez más “virtual”, esta brecha digital es un obstáculo importante para el crecimiento de África. Recientes estimaciones de la UIT han calculado en varios cientos de millones de dólares, procedentes principalmente del sector privado, la inversión necesaria para construir y mejorar la infraestructura regional y nacional de las tecnologías de la información y la comunicación en el continente. Para atraer estas inversiones deben combinarse adecuadamente las medidas políticas y de reglamentación y diseñar cuidadosamente las asociaciones sector público y sector privado. Los esfuerzos realizados por las instituciones de desarrollo ponen en evidencia que la ampliación de las comunicaciones de banda ancha exige realizar inversiones en toda la cadena de suministro (cables submarinos, redes regionales, redes básicas nacionales y acceso rural); mejorar las inversiones privadas; introducir reformas políticas y reglamentarias y estimular la demanda para el tendido y utilización de las redes. También es ampliamente reconocido el hecho de que el acceso a la infraestructura de la banda ancha, la capacidad del sector público y los marcos reglamentarios son factores altamente interdependientes y deben abordarse de una forma integrada. Uno de los retos más grande que enfrenta África es la movilización de los recursos necesarios. La UIT estima que se requieren unos 92.000 kilómetros de enlaces de fibra óptica (incluidos 25.000 kilómetros de rutas de cable submarino internacional) para colmar la brecha de banda ancha regional e internacional. Ello representa una inversión de 1.000 millones USD destinados a una red de fibra óptica submarina internacional y más de 1.600 millones USD destinados a enlaces regionales. Dependiendo del tamaño del país, cada uno de ellos necesitará entre 50 y 500 millones USD para instalar las redes básicas nacionales. [9]

1.6 Cumbre Conectar África

La Cumbre Conectar África, celebrada en Kigali, Ruanda, en octubre de 2007 dio un paso significativo comprometiéndose de manera más activa en las TIC de África. Junto con otros socios, incluidos la UIT, el Banco Mundial, el Consorcio de Infraestructura

para África y la Organización de Comunidades de Telecomunicaciones, se comenzó a trabajar en la implementación de las actividades destinadas a satisfacer los cinco objetivos acordados en la Cumbre Conectar África:

Objetivos de la Cumbre Conectar África en 2007	
Objetivo 1	Interconectar todas las capitales y ciudades principales de África con la infraestructura de banda ancha de las TIC y reforzar la conectividad con el resto del mundo en 2012.
Objetivo 2	Conectar las aldeas africanas a los servicios TIC de banda ancha en 2015 e implementar iniciativas de acceso compartidas tales como telecentros comunitarios y teléfonos de aldea.
Objetivo 3	Adoptar medidas reglamentarias fundamentales que promuevan un acceso asequible y general a toda la gama de servicios de las TIC de banda ancha.
Objetivo 4	Apoyar el desarrollo de una masa crítica de competencias en las TIC para responder a las necesidades de la economía del conocimiento, en particular estableciendo una red de Centros de Excelencia TIC en cada subregión de África y poniendo en marcha centros de creación de capacidad y formación en las TIC.
Objetivo 5	Adoptar una ciberestrategia nacional, incluido un marco de ciberseguridad, e instalar al menos un servicio modelo de ciberadministración así como servicios de cibereducación, cibercomercio y ciberseguridad utilizando tecnologías accesibles en cada país de África en 2012.

Tabla 1-Objetivos de la cumbre conectar África 2007[9]

La Junta de Directores Ejecutivos del BAD (Banco Africano para el Desarrollo) aprobó una estrategia TIC que cubre el periodo 2008-2012. Para los dos primeros años los objetivos principales son la financiación directa del desarrollo de la infraestructura de banda ancha y el apoyo a los esfuerzos africanos para atraer inversión privada mejorando los marcos político y reglamentario con el objetivo adicional de reducir la pobreza y establecer un crecimiento económico sostenible en todo el continente. Para el periodo 2010-2012 la meta será crear un acceso asequible, competencia y crecimiento económico en los países miembros regionales mediante el uso extendido de las TIC por las instituciones, empresas y público en general.[9]

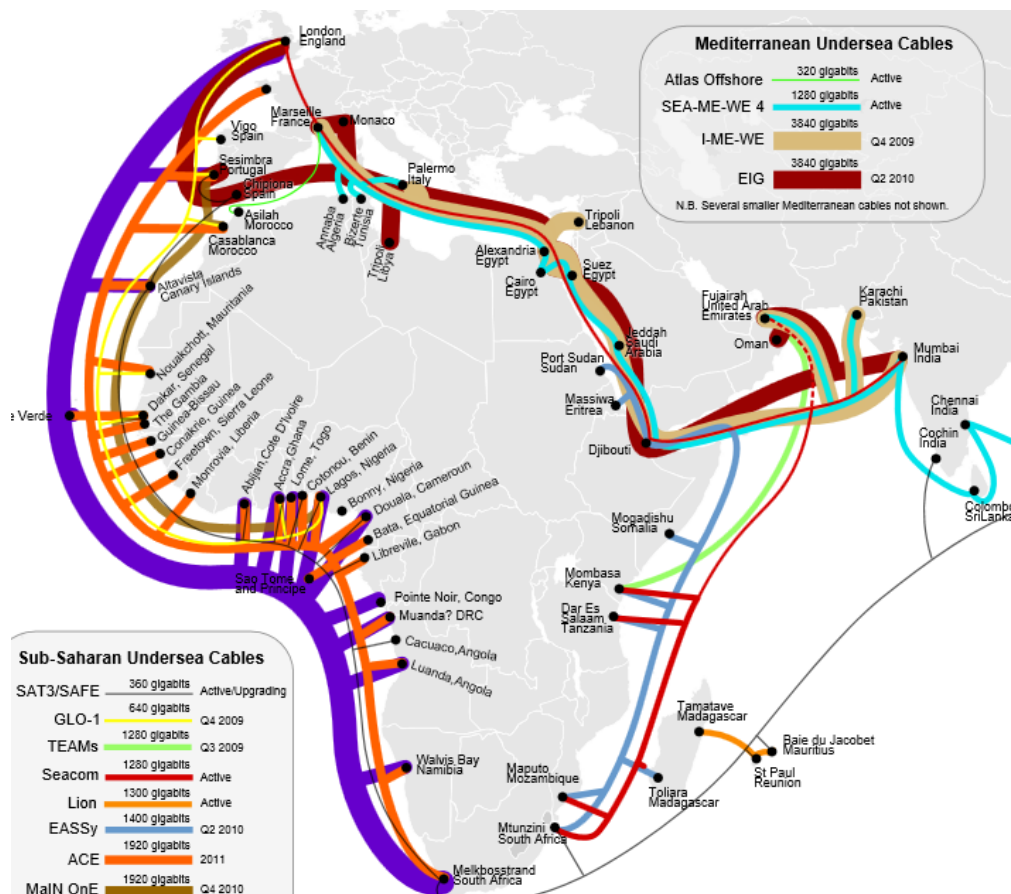


Figura 6-Despliegue de fibra óptica por África[9]

ACE (*Africa Coast to Europe*), es un proyecto de interconectar el continente europeo con los países de la costa africana mediante enlace por fibra óptica submarina intercontinental partiendo de Marselle (Francia) pasando por Vigo (España) hasta Melkbosstrand (Sudáfrica) ramificándose a lo largo de toda la costa africana en una extensión de aproximadamente 14.000 km. Tuvo su inicio en noviembre de 2009 y a finales 2011 ya estaba operacional con una capacidad mínima de 1.92 Tbitps con participación de 25 operadoras de telecomunicaciones. Paralelamente a este proyecto, en las islas de STP también se estaba desplegando en simultaneo el enlace por fibra óptica a lo largo y ancho de todo el país.[9]

1.7 Red de transporte en los sistemas celulares

Al intensificarse el uso de la red de redes (*internet*) se afianza la incorporación de funciones de voz en redes de datos. Se generaliza la tendencia hacia que la voz no consuma más que una pequeña parte del ancho de banda y todas las problemáticas para operadoras y responsables de sistemas está en gestionar adecuadamente un flujo de

datos cada vez más denso. El rápido incremento en el uso de servicios de datos móviles ha obligado a muchos operadores móviles a invertir en infraestructura de red para seguir siendo competitivos y minimizar la pérdida incontrolada de abonados. El tráfico de datos exige ahora más ancho de banda que los servicios de voz en las redes de operadores, lo cual sobrecarga las conexiones de re-direccionamiento existentes. Como resultado, surge la necesidad de migrar hacia tecnologías innovadoras de *backhaul* móvil de modo que pueda ofrecer soluciones para ayudar a los operadores móviles a dar respuesta a ese incremento de datos optimizando de la mejor forma los recursos y la infraestructura ya existentes.

1.7.1 Carrier Ethernet como tecnología de transporte

Carrier Ethernet es la plataforma para permitir la adopción, la implementación y la creación de servicios a gran escala (MAN y WAN). Con OAM (*Operation, Administration and Management*) amplios, de alta escala, basados en *hardware* permitiendo a proveedores ofrecer medición en tiempo real de acuerdos de nivel de servicio (SLA) y garantizar los mismos.

Las principales ventajas de esta técnica radican en la capacidad de ayudar a los proveedores de servicio a incrementar los ingresos, disminuir los gastos y manejar los retos de integración dentro de cientos de aplicaciones. Las soluciones de extremo de red de *Carrier Ethernet* y de agregación ayudan a que los proveedores puedan expandir la cobertura de sus servicios con el uso de fibra, cobre y TDM, mejorar el tiempo de funcionamiento y ofrecer un rendimiento escalable y uniforme, incrementar los ingresos y la retención del cliente, integrarse fácilmente a la infraestructura existente con implementación *plug-and-play*, ofrecer una experiencia uniforme y exitosa para el cliente desde 1Mbps hasta 10Gbps y diferenciar su oferta de servicios.[10]

1.7.2 Ethernet Óptica convergente.

Los servicios *Carrier Ethernet* con reconocimiento de flujo de paquetes IP están sustituyendo rápidamente a los servicios de conectividad antiguos, incluidos los T1, E1, ATM y *Frame Relay*. Una gama completa de topologías de servicio (de punto a punto, de punto a multipunto y de multipunto) compatibles con un amplio número de extremos, como estaciones base, con suministro de servicio escalable es un requisito

básico.[11] Las funcionalidades de *Carrier Ethernet* están desarrolladas y añadidas de un modo sistemático en conmutaciones *Carrier Ethernet*, construidas especialmente y en plataformas *Ethernet* ópticas convergentes para arquitecturas escalables de extremo a extremo. Los servicios ópticos como las líneas privadas admiten aplicaciones específicas de punto a punto de ancho de banda elevado que a menudo no requieren paquetes en la red. Los servicios ópticos son compatibles en una capa OTN (*Optical Terminal Network*), proporcionando niveles variables de granularidad de ancho de banda que permiten la compatibilidad con las conexiones de línea privada de longitud de onda secundaria y completa. Entre las tasas estándar de la OTN se incluyen 1, 10, 40 y 100 Gbps, todas alineadas con las definiciones de interfaz de 1, 10, 40 y 100 GbE. Otros clientes de servicios especiales, como el canal de fibra, también pueden transportarse eficazmente utilizando la misma infraestructura de OTN. La supervisión de la gestión de la ruta y la sección de OTN proporciona herramientas excelentes y familiares para la supervisión y verificación de SLA (Acuerdos de nivel de servicio).[12]

1.7.3 Backhaul móvil

Backhaul móvil es el segmento de red de los operadores telefonía móvil que une los sitios celulares y sus respectivos controladores. *Backhaul* móvil con *Carrier Ethernet* es la aplicación con una mayor demanda de nuevas inversiones en infraestructuras para los operadores de telefonía móvil. A medida que los consumidores continúan exigiendo más desde sus dispositivos móviles, se ha creado un excepcional aumento en el tráfico de datos y creado una presión nunca antes experimentada sobre la red móvil. Al mismo tiempo, los operadores móviles buscan aumentar el tamaño de sus redes y modernizar las “tuberías” que transportan el tráfico de las torres de telefonía móvil a la red y actualizar el *backhaul* de las líneas TDM a Gigabit Ethernet.

En el *backhaul* recae el mayor costo del sistema lo que constituye la mayor consideración en la migración hacia otras generaciones ya que al igual que en lo relacionado con el tráfico adicional, este debe ser capaz de manipular un rango de nuevas funcionalidades derivadas que incluyen la gestión de la calidad de servicio y la resiliencia. Estos nuevos elementos incrementarán su importancia en la medida en que los operadores migren hacia redes basadas en paquetes.[13] Además, se requiere que los

operadores protejan simultáneamente las inversiones en las tecnologías iniciales establecidas por varios años y al mismo tiempo elaboren una estrategia para que el *backhaul* esté preparado para futuro de forma que sea capaz de soportar nuevas generaciones de redes móviles, pero esta evolución de los servicios desde 2G hacia 3G y 4G impone cambios en la infraestructura de acceso requerida. Los operadores de servicios móviles tienen que enfrentarse a un aumento brusco en las demandas de ancho de banda debido a la proliferación de servicios de datos basados en 3G y las mejoras emergentes introducidas en la interface del aire para el logro de altas velocidades de transmisión como es HSPA. Además, deben ahora ser capaces de soportar simultáneamente demandas con tecnologías que divergen de las redes existentes 2G/2.5G a aquellas que emergen producto de la operación de redes 3G. La migración desde redes de conmutación de circuitos 2G basadas en TDM a redes 3G/4G basadas en conmutación de paquetes, como son *Ethernet*, IP (*Internet Protocol*) y MPLS(*Multi Protocol Label Switching*) introduce nuevos desafíos.[14] En particular, los operadores de redes móviles deben evaluar el costo, la conveniencia y la disponibilidad de la plataforma de acceso elegida para el manejo del incremento en la capacidad de ancho de banda y ser capaces a la vez de gestionar las complejidades de una red con convergencia de voz, video, datos e *internet*. Estos operadores también deben proteger los servicios tradicionales como la voz, que aún se tienen que tomar en consideración en la distribución sustancial de los ingresos.

1.7.4 Carrier Ethernet para backhaul móvil

Los equipos de *backhaul* móvil con *Carrier Ethernet* deben poseer las siguientes características:

- Brindar fiabilidad de la calidad de servicio de redes SONET/SDH tradicionales y la flexibilidad para prestar múltiples servicios a velocidades de puerto 1/10GE en un entorno *Ethernet* metropolitano.
- Las técnicas de distribución de la medición del tiempo, patentadas permiten a los dispositivos de demarcación generar mediciones de retardo unidireccional altamente precisas y se integran perfectamente en la medición de tiempo de la red, con lo que tiene fácil acceso a los servicios de medición de tiempo.

- Deben admitir el aumento de cientos de Mbps por estación base para *backhaul*, si se compara con los múltiplos de T1s ($n \times 1,5$ Mbps) o E1s ($n \times 2$ Mbps) de las generaciones anteriores.[15]

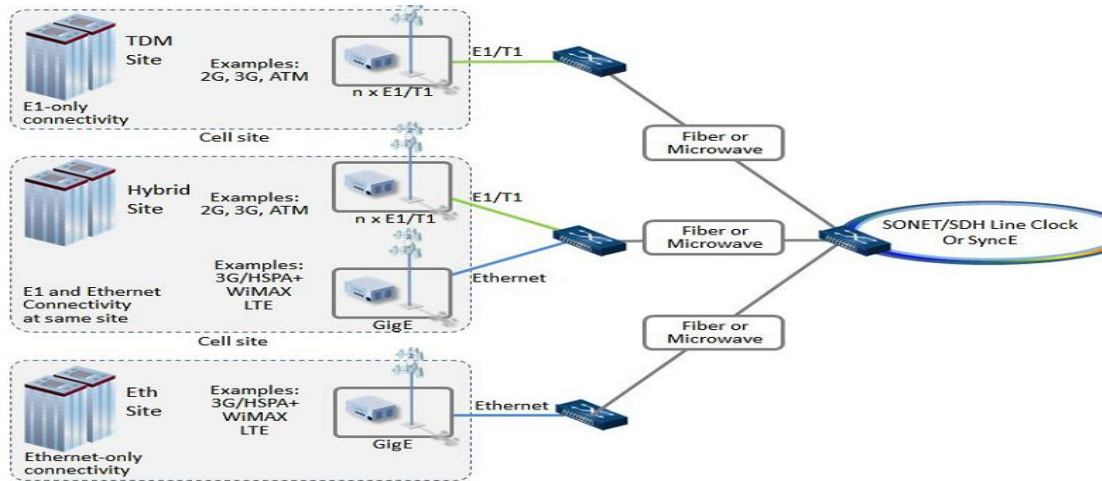


Figura- 7-Backhaul con Carrier Ethernet[12]

CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA NUEVA GENERACIÓN.

2. *Long Term Evolution* (LTE)

Después de más dos décadas de un ininterrumpido crecimiento de las comunicaciones móviles, primeramente con GSM y posteriormente con el despliegue definitivo de UMTS, el presente se prepara para enfrentar una nueva generación de comunicaciones móviles, la cuarta generación o 4G, de la que el sistema LTE, cuyas especificaciones fueron desarrolladas por el grupo 3GPP a finales del año 2008, puede considerarse el primer eslabón en una trayectoria evolutiva que debe culminar con el *LTE-Advanced*. Son muchas las variantes que LTE introduce en relación a sistemas de comunicaciones móviles previos y que se describe en este capítulo, sin embargo dos aspectos relevantes que cabría destacar son que en LTE, por primera vez, todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo IP, y que las velocidades de la interfaz radio se sitúan dentro del rango de 100 Mbps y 1 Gbps, ampliamente superiores a las conseguidas en los sistemas predecesores.[16] Con LTE se rompe definitivamente las barreras que todavía impedían la consecución plena de una movilidad con servicios multimedia. Lo que sería equivalente a afirmar que con la aparición de LTE los usuarios que lo deseen ya no tendrán que verse penalizados en su capacidad de comunicación por el hecho de ser móviles en lugar de fijos. Puede decirse que el primer paso hacia LTE se llevó a cabo en noviembre de 2004, cuando 3GPP TSG RAN organizó un *Workshop* sobre “*RAN Evolution*” en Toronto (Canadá), en el que se presentaron unas 40 contribuciones con ideas y propuestas con la finalidad de lograr principalmente los siguientes objetivos:

- Velocidades de transmisión de pico de 100 Mbps en *downlink* y 50 Mbps en *uplink*, mejorando la velocidad de transmisión obtenible en el extremo de la célula.
- Mejora de la eficiencia espectral en un factor 2-4 con respecto a la *Release 6*.
- Latencia del plano de usuario en la red de acceso radio inferior a 10 ms.
- Ancho de banda escalable.
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP.

La primera versión completa de las especificaciones LTE se aprobó en diciembre de 2007, durante 2008 el trabajo del 3GPP se centró en la finalización de *Release 8*,

aunque también se han ido desarrollando con intensidad aspectos de *Release* 9 y *Release* 10. Hoy por hoy se trabaja en mejoras substanciales que se estandariza en *releases* sucesivos e incluso ya se trabaja en lo que se clasifica como quinta generación de telefonía celular 5G.[17]

2.1. Arquitectura de LTE

De forma genérica se puede resumir la arquitectura de una red celular con tres elementos fundamentales:

- El equipo de usuario: en este caso particular se pueden considerar como teléfonos móviles que son radioteléfonos de baja potencia que permite, en simultáneo con la tarjeta SIM, al usuario conectarse a red de acceso posibilitando su utilización a través de una interfaz de radio.
- Red de acceso: permite el intercambio de información entre el equipo de usuario y la red troncal. Básicamente se compone de las estaciones bases y sus controladores que a su vez se encarga de gestionar el uso de los recursos de radio para provisión de una cierta capacidad de transmisión de forma eficiente.
- Red troncal: funciones asociadas con el control de los servicios finales ofrecidos a los usuarios tales como control de acceso a la red, gestión de movilidad, mecanismo de interconexión con otras redes y está formada por equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, encaminamiento de paquetes, bases de datos, etc.

Esta arquitectura genérica ha sido adoptada en las diferentes familias de sistemas celulares 2G y 3G, y también se mantiene en el sistema LTE. La separación entre la red de acceso y red troncal confiere un importante grado de flexibilidad al sistema con perspectiva a soportar un proceso evolutivo en el que se puedan ir mejorando, agregando o sustituyendo las diferentes partes de la red con la mínima afectación posible al resto de la misma. Formalmente, la nueva red de acceso recibe el nombre de E-UTRAN (Evolved UTRAN) aunque muchas veces se utiliza también el término LTE en las especificaciones como sinónimo de E-UTRAN.[18] Asimismo, en lo concerniente a la red troncal, 3GPP utilizó el término SAE (*System Architecture Evolution*) para referirse a las actividades de estudio relacionadas con la especificación de una red troncal evolucionada de conmutación de paquetes. Para mantener la misma arquitectura anterior y lograr mayor factibilidad a la hora de

operaciones de mantenimiento el 3GPP ha diseñado la nueva arquitectura de red E-UTRAN conservando los elementos anteriores pero resumiéndolos en tres grandes bloques como muestra en la figura 8 a continuación.

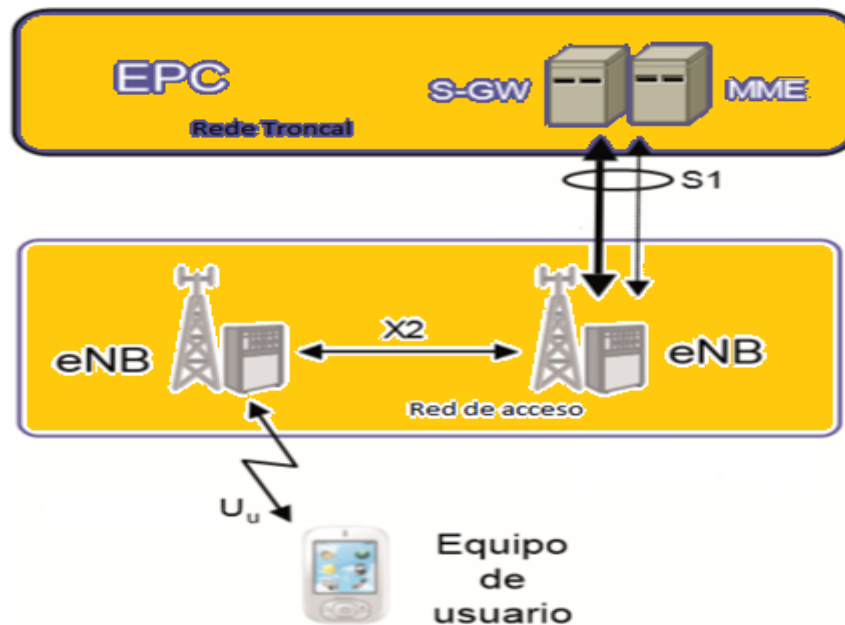


Figura- 8-Arquitectura de una red E-UTRAN[18]

2.2. Evolved Packet Core (EPC)

La red troncal de paquetes evolucionada EPC ha sido concebida principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN.

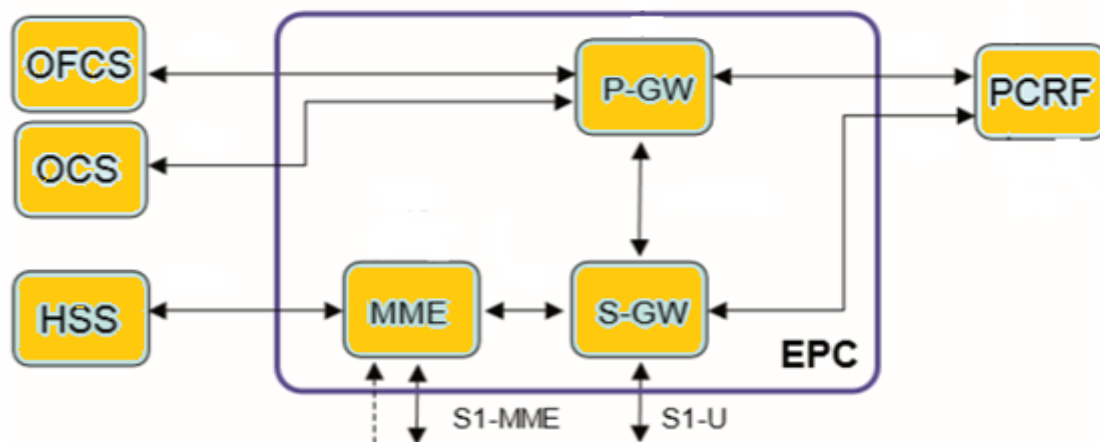


Figura- 9-Entidades presentes en EPC[18]

La entidad MME (*Mobility Management Entity*) se encarga de las funciones y señalización del plano de control de los equipos de usuario conectados a la red LTE mediante los protocolos NAS y controla las funciones de transferencia del plano de usuario de red a través de la pasarela S-GW.[19] Asimismo, la entidad MME se conecta a la entidad HSS (*Home Subscriber Server*) para acceder a la información asociada a los usuarios de la red que estén autorizados a establecer conexiones a través de E-UTRAN. La pasarela P-GW (*Packet Data Network Gateway*) permite la interconexión entre EPC y redes externas o plataforma de servicio soportando también funciones de asignación de direcciones IP a los equipos de usuario y mecanismos de control de los parámetros de calidad de servicio de las sesiones de datos establecidas a través de la red. La entidad PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) constituye un elemento clave de todos los sistemas 3GPP, y en particular, del sistema LTE.[18] La entidad PCRF forma parte del marco funcional denominado PCC (*Policy and Charging Control*) que se utiliza para controlar los servicios portadores que ofrece la red LTE así como realizar el control de los mecanismos de tarificación. Las entidades OFCS (*Offline Charging System*) y OCS (*Online Charging System*) constituyen el núcleo del sistema de tarificación de la red. El marco de tarificación soportado es un marco flexible que permite desplegar modelos de tarificación en base a diferentes parámetros tales como tiempo de uso, volumen de datos, eventos, etc.

2.3. Evolved Node B (eNB)

El eNB integra todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en el eNB terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio. Mediante dichos protocolos, el eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia y desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina formalmente como servicio portador radio (Radio Bearer, RB). El eNB mantiene un contexto de cada uno de los equipos de usuario que tiene conectados. En dicho contexto se almacena la información necesaria para mantener los servicios de E-UTRAN activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.). Sin duda, la funcionalidad clave de un eNB consiste en la gestión de los recursos radio.[20] Así, el

eNB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad, asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente, control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc. Otra función importante introducida en la funcionalidad de un eNB es la selección dinámica de la entidad MME de la red troncal EPC cuando un terminal se registra en la red LTE. Esta función otorga un grado de flexibilidad muy importante en la operativa de la red. En E-UTRAN, a diferencia de arquitecturas más jerarquizadas como GERAN o las primeras versiones de UTRAN, un eNB puede estar conectado simultáneamente a múltiples MME de la red troncal. El conjunto de MME a los que tiene acceso un NB se denomina su *pool area*. Así, mediante la selección de qué entidad MME va a controlar el acceso de cada usuario, es posible balancear la carga de señalización entre diferentes MME así como aumentar la robustez del sistema frente a puntos de fallo críticos. Al igual que la posibilidad de interactuar con múltiples MME, un eNB puede enviar y recibir paquetes IP de los usuarios a los que sirve a través de diferentes pasarelas S-GW de la red troncal EPC. Ello conlleva que el eNB albergue funciones de encaminamiento del tráfico de los usuarios hacia la pasarela de red S-GW correspondiente. La elección de S-GW en este caso compete a la entidad MME y no al eNB. Un eNB puede gestionar una o varias celdas. Un caso típico es el uso de sectorización de forma que, el eNB ubicado en un emplazamiento soporta tantas celdas como sectores.[18]

2.4. Técnicas de acceso múltiple

Las tecnologías de nivel físico empleadas en LTE, constituyen unas de las principales diferencias en comparación con sistemas predecesores de comunicaciones móviles permitiéndole conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de recursos de radio.

2.4.1. Multiplexación Ortogonal por División de Frecuencia-OFDM

La técnica de transmisión OFDM constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora que consiste en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de sub-portadoras. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de dichas sub-portadoras, es

posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción.[21]

La característica fundamental de la técnica OFDM es el empleo de un conjunto de K sub-portadoras que presentan la propiedad de ser ortogonales. Asumiendo la notación de señales complejas, dichas sub-portadoras pueden modelarse en banda base como:

$$x_k(t) = e^{j2\pi k\Delta f t} \text{rect}_{Ts}(t) \quad 0 \leq k \leq K-1$$

$$f_k = k\Delta f \quad \Delta f = 1/Ts$$

donde f_k es la frecuencia de la subportadora k-ésima y $\text{rect}_{Ts}(t)$ representa un pulso rectangular con duración entre 0 y Ts . [22] Por otra parte, Δf es la separación entre sub-portadoras. Obsérvese que, con esta definición, dos sub-portadoras diferentes $x_m(t)$ y $x_k(t)$ cumplen la condición de ser ortogonales en el intervalo temporal Ts , lo que significa que la integración del producto de las mismas en dicho intervalo es nula excepto cuando $m=k$:

$$R = \int_0^{Ts} x_m(t) x_k^*(t) dt = \int_0^{Ts} e^{j2\pi(m-k)\Delta f t} dt = \int_0^{Ts} e^{j2\pi(m-k)\frac{t}{Ts}} dt = \begin{cases} Ts & \text{si } m=k \\ 0 & \text{si } m \neq k \end{cases}$$

Nótese igualmente que la propiedad de ortogonalidad entre sub-portadoras se consigue precisamente gracias a la relación existente entre la separación de las mismas Δf y su duración temporal Ts .

2.4.2. Técnica de acceso para enlace descendente.

El enlace descendente de LTE surge a partir de la técnica de transmisión OFDM que posibilita que los diferentes símbolos modulados sobre las sub-portadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en sub-portadoras diferentes, tal y como se ilustra en el esquema de transmisión de la Figura 10.

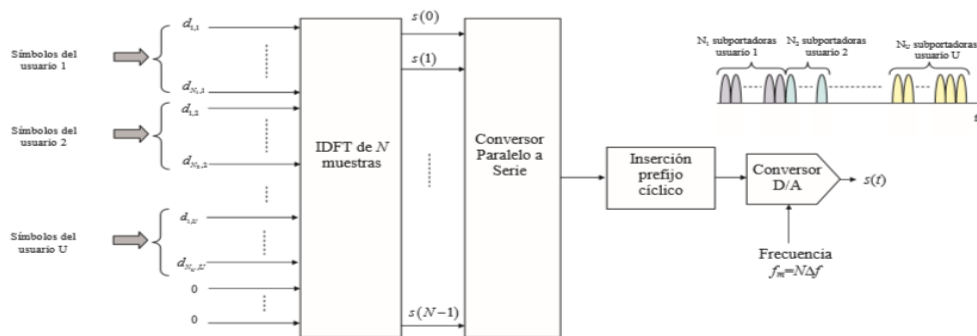


Figura- 10-Esquema de transmisión OFDMA[21]

Este es el acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA). Obsérvese que en dicha figura existen U flujos de información correspondientes a diferentes usuarios, siendo N_k el número de símbolos enviado para el usuario k-ésimo, y donde $d_{i,k}$ representa el i-ésimo símbolo del k-ésimo usuario. Análogamente, en el receptor de cada usuario bastará con recuperar el contenido de las sub-portadoras asignadas a dicho usuario para separar la información destinada a este usuario de la del resto.[23]

La selección de OFDMA como técnica de acceso múltiple en LTE es debido a un conjunto de ventajas que la hace idónea que se describe a continuación:

- **Diversidad multiusuario:** la asignación de sub-portadoras a usuarios se lleva a cabo dinámicamente, pudiéndose cambiar en períodos cortos de tiempo dicha asignación a través de estrategias de *scheduling*. De esta forma, teniendo en cuenta que el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes sub-portadoras, y que dichos desvanecimientos serán independientes para cada usuario, se puede intentar seleccionar para cada sub-portadora aquél usuario que presente un mejor estado del canal (que perciba una mejor SNR), lo que se traducirá en una mejor utilización de la banda disponible para conseguir una mayor velocidad de transmisión, o sea, una mayor eficiencia espectral.
- **Diversidad de frecuencia:** es posible asignar a un mismo usuario sub-portadoras no contiguas, suficientemente separadas como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que proporciona diversidad de frecuencia en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.

-
- Robustez frente a la propagación multi-camino: Gracias a la aplicación del prefijo cíclico, la técnica OFDMA es muy robusta frente a la interferencia intersímbolos resultante de la propagación multitrayecto y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan más eficientes y menos complejas que las técnicas de ecualización clásicas en el dominio temporal, particularmente cuando se tiene que efectuar una transmisión de banda ancha y en consecuencia se está ante canales muy dispersivos. Esto es particularmente relevante cuando se pretenden emplear bandas de transmisión superiores a 5 MHz, como ocurre con LTE, en que se pretende llegar hasta los 20 MHz.
 - Elevada granularidad en los recursos asignables: Al subdividir la banda total en un conjunto elevado de sub-portadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, lo que resulta útil para acomodar servicios con diferentes requerimientos de calidad. Por el contrario, en otras técnicas como CDMA, la variación en la cantidad de recursos asignables a cada usuario se consigue principalmente mediante la modificación del factor de ensanchado (*spreading factor*), que acostumbra a tener una granularidad menor en tanto que suele variar en potencias de 2.
 - Flexibilidad en la banda asignada: La técnica OFDMA proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de los requerimientos de servicio de cada uno, simplemente a base de la asignación de más o menos subportadoras por usuario. Nótese que esto puede llevarse a cabo sin ninguna modificación en el proceso de modulación, solamente cambiando los valores de entrada sobre los que se efectúa la IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*).

Por otro lado, esta técnica de acceso múltiple también presenta desventajas tales como:

- Uno de los inconvenientes de las técnicas de transmisión multiportadora como OFDMA es que la potencia instantánea transmitida puede ser significativamente superior a la potencia media, lo que plantea problemas de linealidad para los amplificadores de potencia, limitando su eficiencia e incrementando su coste.

-
- Susceptibilidad frente a errores de frecuencia: la separación entre sub-portadoras coincide con el inverso de la duración del símbolo OFDMA. Por este motivo, en el caso de que existan desplazamientos en la frecuencia de las sub-portadoras respecto de su frecuencia de referencia, esto se traducirá en una cierta pérdida de ortogonalidad y la consiguiente interferencia entre subportadoras. Los motivos de estos errores en frecuencia pueden ser diversos, como por ejemplo la estabilidad de los osciladores, el efecto *Doppler* asociado al movimiento de los terminales, etc.

2.4.3. Asignación dinámica del enlace

Los sistemas LTE utilizan tres esquemas de modulación simultáneamente en dependencia del estado del enlace, una de las características de OFDMA es que no impone a priori ninguna condición sobre los símbolos que se modulan sobre las diferentes sub-portadoras, y en consecuencia pueden pertenecer a modulaciones que incluyan más o menos bits de información por símbolo según el orden de la modulación empleada reflejado en el número de símbolos de su constelación. La Figura 11, ilustra a modo de ejemplo las constelaciones para las modulaciones QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) y 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Como puede apreciarse, la constelación define por un lado las amplitudes de la componente en fase (I) y cuadratura (Q) asociadas a cada símbolo o punto, y por otro lado la correspondencia entre símbolos y grupos de bits. Puede verse como, en el caso de utilizarse una modulación QPSK, cada uno de los símbolos corresponde a 2 bits de información, mientras que en el caso de emplearse una modulación 16-QAM cada símbolo corresponde a 4 bits. Igualmente, en el caso genérico de una modulación m-QAM con m símbolos cada símbolo correspondería a $\log_2 m$ bits.

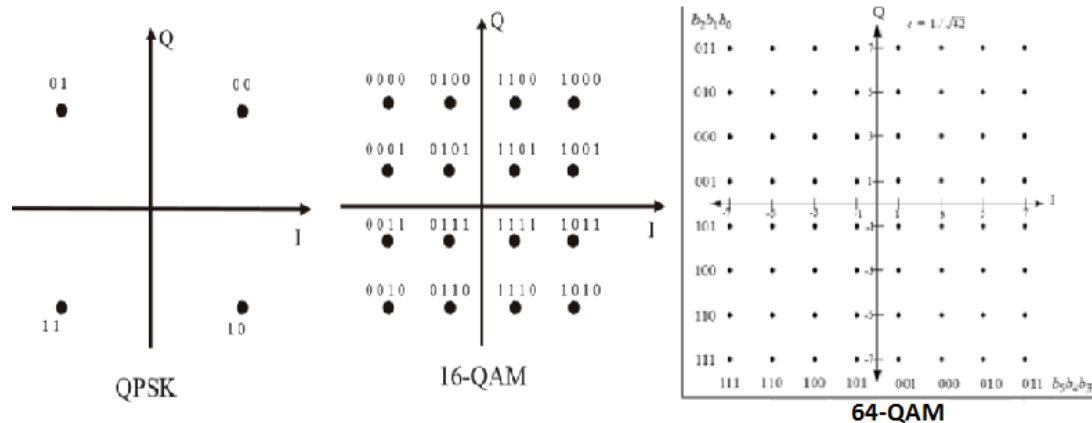


Figura- 11-Constelaciones QPSK y QAM[6]

De esta forma, la velocidad de transmisión en bits/s que finalmente resultaría sobre una sub-portadora con una duración de símbolo T_s y prefijo cíclico T_p y con una modulación que empleara una constelación de M símbolos sería:

$$R(b/s) \log M / (T_s + T_p)$$

Con objeto de incrementar la velocidad de transmisión resultaría conveniente incrementar número de bits por símbolo de la modulación empleada a base de utilizar constelaciones con más símbolos. Sin embargo, ante unas condiciones SNR (*Signal to Noise Ratio*) en el canal, el empleo de modulaciones de orden elevado ocasiona un peor comportamiento en términos de probabilidad de error de bit, ya que al existir más símbolos en la constelación y encontrarse éstos más próximos, es más fácil que debido al ruido se detecte erróneamente un símbolo en lugar de otro. Por este motivo, para poder emplear satisfactoriamente modulaciones con un número elevado de símbolos, es preciso disponer de buenas condiciones SNR. Por lo general, dada una modulación, ésta podrá emplearse apropiadamente con una tasa de error acotada, en tanto que la relación señal a ruido existente en el canal esté por encima de un cierto umbral mínimo, que será mayor cuanto mayor sea el orden de la modulación.

El proceso de adaptación de enlace para OFDMA se ilustra gráficamente en la Figura 12, en un ejemplo en el que existen tres modulaciones disponibles, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La selección de la modulación se efectuaría previa al proceso de la IDFT

(Inverse Discrete Fourier Transform) en función de la SNR medida para las subportadoras asignadas al usuario en cuestión.

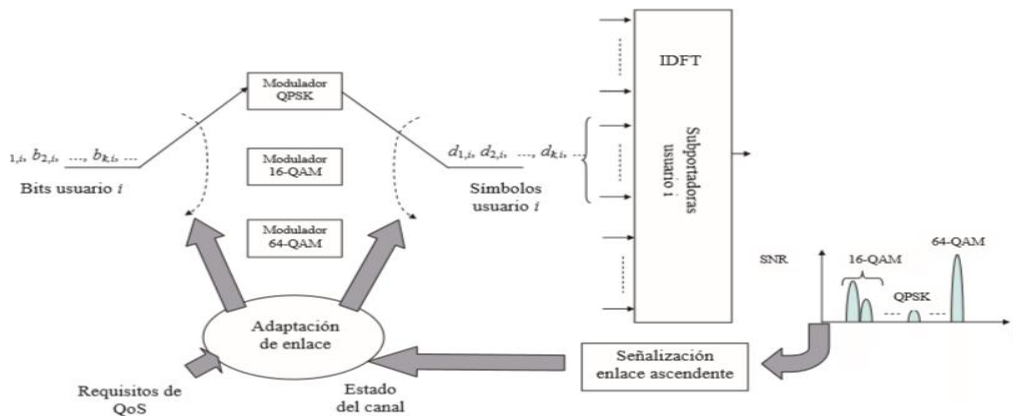


Figura- 12-Adaptación de enlace[24]

Una misma modulación puede combinarse con diferentes códigos de canal y en consecuencia disponer de mayor o menor robustez frente a errores, aunque esto afectará a la velocidad de transmisión neta según la redundancia añadida por el código. Por ejemplo, en el caso de emplearse una modulación con una constelación de M símbolos y una codificación de canal de tasa r , lo que significa que por cada bit de información útil se están transmitiendo un total de $1/r$ bits, la velocidad neta que se conseguiría es:

$$R (b/s) = r \log M / (T_s + T_p)$$

Cuanto menor sea la tasa del código r mayor será su robustez para corregir errores, pero esto reducirá la velocidad neta que se puede conseguir. De acuerdo con esto, desde una perspectiva genérica, dadas unas condiciones de SNR, el mecanismo de adaptación de enlace intentará escoger la combinación de codificación de canal y modulación (MCS) que permita conseguir la máxima velocidad de transmisión neta. Como una de las sub-tareas de *scheduler* en LTE, el mecanismo de adaptación dinámica del enlace se basa por un lado en control de la tasa binaria, que consiste en ir variando la tasa binaria asignada a un usuario activo en función de la calidad del canal, y por otro lado en la estimación de la calidad del canal que, para el *uplink*, se obtiene a partir de la recepción de las SRS (*Sounding Reference Signals*) y, para el *downlink*, viene dada en la información contenida en los CSR (*Channel Status Reports*). A partir de esta estimación es posible determinar un esquema de modulación y codificación para garantizar una determinada BER (*Bit Error Rate*) que dependerá del servicio ofrecido y de los

esquemas de codificación disponibles. Así, el usuario percibirá una tasa binaria alta si la calidad del canal es buena, y baja si la calidad del canal es mala. La Figura 13 muestra, junto al límite teórico de capacidad de Shannon, una tabla genérica para obtener una BER de 10^{-2} consiguiendo la máxima velocidad de transmisión posible para cada valor de SINR (*signal interference noise relation*) (considerando que la estimación de la calidad del canal se pudiese traducir en distintos valores de SINR). Se puede apreciar que para SINR bajas, se emplean mecanismos de modulación y codificación más robustos como BPSK, a costa de tener una baja eficiencia espectral y por lo tanto reducir la tasa binaria.

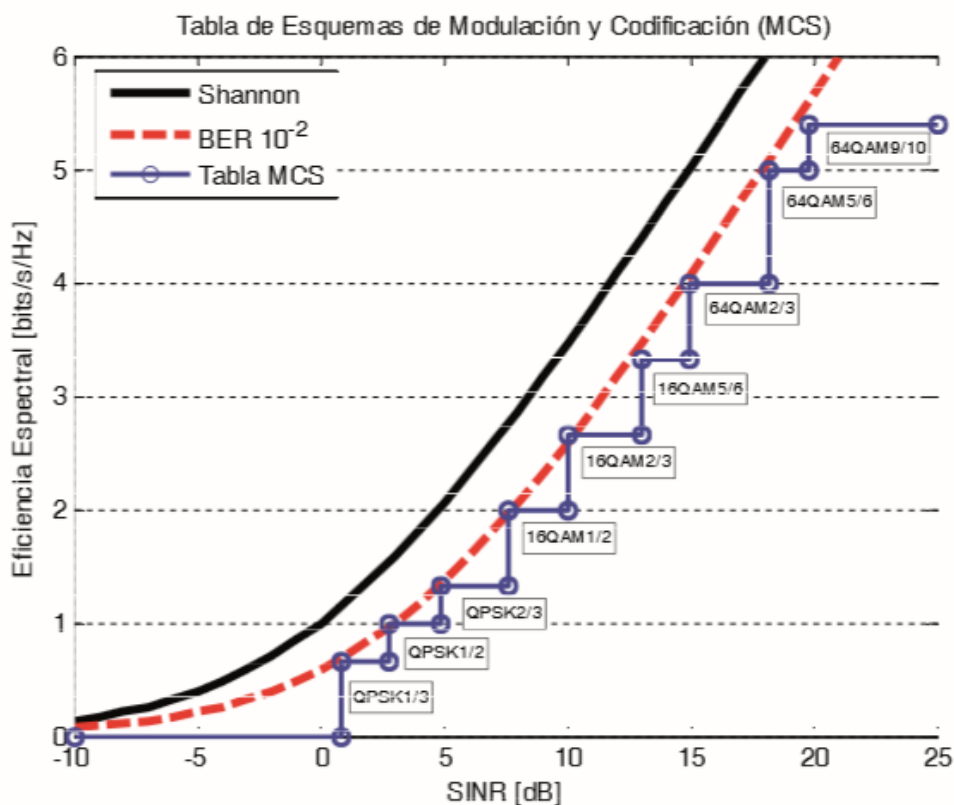


Figura- 13-Esquemas de Modulación y Codificación[25]

En LTE las transmisiones se organizan en TB (*transport blocks*). La adaptación dinámica del enlace se realiza mediante la selección del TF (*Transport Format*). El TF especifica cómo se van a realizar las transmisiones a través de la interfaz radio para un determinado *radio bearer*. En concreto se especifica el tamaño del TB, el esquema de modulación y el *mapping* en las antenas en el caso de transmisión MIMO. El TF se envía a través del denominado DCI (*Downlink Control Indicator*) en el canal PDCCH. De hecho, el DCI también transporta otra información de *scheduling* para el DL o UL

como el número de PRB asignados. El formato de modulación y codificación y el tamaño del TB se especifican con 5 bits en el DCI. Éstos 5 bits permiten indexar una tabla de 32 entradas, donde para cada entrada se especifica una modulación y un índice a otra tabla donde se especifica el tamaño del TB (en bits) en función del número de PRB asignados. La tasa de codificación resultante se puede obtener conocida la modulación, el tamaño del TB y el código de canal. Los esquemas de modulación utilizados en DL son QPSK, 16 QAM y 64 QAM, mientras que para el UL se contempla QPSK y 16 QAM y opcionalmente 64 QAM dependiendo de las capacidades del terminal.[26]

2.4.4. Gestión de Recursos de Radio

Los sistemas de comunicaciones móviles celulares presentan un gran dinamismo debido a las variaciones de las condiciones de propagación, las variaciones de tráfico, movilidad de los usuarios, o incluso la interferencia. Adicionalmente, la interfaz radio ha de soportar el acceso de un número elevado de usuarios a través de servicios de distinta índole y con unos requerimientos de calidad de servicio que se deben garantizar en todo momento independientemente del dinamismo del sistema. El incumplimiento por parte del operador de los requisitos de QoS podría provocar el descontento de sus abonados y por lo tanto una pérdida clara de negocio. En un intento por respetar la calidad de servicio, el operador podría optar por sobredimensionar el número de recursos radio disponible. Sin embargo, esta estrategia no resulta adecuada en el ámbito de las comunicaciones móviles debido a que los recursos radio son, en general, escasos y caros. En su lugar, se debe gestionar dinámicamente la interfaz radio incorporando a la red acceso un conjunto de funciones que permitan controlar y gestionar de manera eficiente los recursos radio con el mínimo sobredimensionado posible. De manera general, a ese conjunto de funciones es lo que se define como Gestión de Recursos Radio (RRM) de sus siglas en inglés. La gestión de recursos radio se encarga, por un lado, de racionalizar el uso de los recursos radio como frecuencias, ranuras temporales (*time slots*), potencia, o códigos según la tecnología de acceso radio, al mismo tiempo que se permite el acceso al mayor número de usuarios posible. Por otro lado, se responsabiliza de garantizar unos determinados niveles mínimos de calidad de servicio, asociados con cada uno de los servicios establecidos en el segmento radio, como paso

intermedio para conseguir un cierto nivel de calidad de servicio extremo a extremo. La consecución simultánea de estos objetivos no es sencilla, ya que, el uso eficiente de recursos, la maximización de la capacidad, y el logro de la calidad de servicio suele ir en direcciones opuestas. Es por ello que la gestión de recursos radio no es una función única, sino que se compone de varias funciones que se encargan de gestionar distintos aspectos de la interfaz radio, y cuya ejecución, permite en conjunto, la consecución de los distintos objetivos.[27]

En concreto, el estándar LTE define una serie de funciones y conceptos RRM y especifica las interfaces y señales necesarias para la ejecución de dichas funciones, pero no especifica los algoritmos o estrategias concretas que implementan dichas funciones. De esta forma, el fabricante puede diferenciar sus productos mediante la implementación de sus propias estrategias, y se permite una cierta flexibilidad para el operador a la hora de elegir los algoritmos RRM específicos que quiere para gestionar su red. Como resultado, se ha generado una gran actividad investigadora que ha dado lugar a numerosas propuestas de estrategias RRM en la literatura científica, de las cuales se introducen brevemente a continuación.[28]

2.5. Balance de carga

El balance de carga (LB) es un mecanismo que se encarga de gestionar distribuciones no uniformes de usuarios entre múltiples celdas. Durante la planificación y despliegue de una red celular se asignan recursos a cada estación base de forma acorde a la demanda de tráfico esperada. Esto lleva a un reparto similar de recursos radio por celda en áreas de características de tráfico similares. No obstante, debido a las condiciones cambiantes de un sistema celular, es posible que se llegue a situaciones de descompensación de la carga, donde unas estaciones base estén sobrecargadas y otras en la misma zona estén trabajando por debajo de su capacidad. En LTE, LB se contempla tanto para usuarios que se encuentran en estado RRC-IDLE, como para aquellos que tienen conexiones activas en estado RRC-CONNECTED. El primero atiende al motivo de movilidad CLB (*camp load balancing*), mientras que el segundo hace referencia al motivo de movilidad TLB (*traffic load balancing*) también incluido, ambos explicados en lo sucesivo.[29]

-
- El procedimiento de CLB busca distribuir uniformemente a los usuarios en estado no activo (RRC-IDLE) entre las bandas/portadoras/RATs disponibles. De esta forma se consigue que, tras la activación, la carga de tráfico de las bandas/portadoras/RAT esté balanceada. También se iguala el consumo de recursos radio por parte de los terminales a la hora de responder a llamadas de *paging* o actualizar el área de seguimiento. Por último, estas acciones de balanceo pueden verse motivadas por tener a determinados usuarios (aquellos con subscripciones de alta velocidad de datos) ya sincronizados con la RAN por la que el operador tiene interés en cursar sus servicios, evitando así el tener que hacer un HO cuando entren en estado RRC-CONNECTED. El mecanismo para conseguir el balanceo de carga se basa en el envío de prioridades por banda de frecuencias y RAT, de forma que el operador orienta a los terminales hacia una determinada banda de frecuencias y RAT. Por otro lado, también es posible balancear la carga controlando el parámetro *offset Q* en las expresiones de CRIF (*cell reselection intra-frequency*) dadas en y que es específico para cada celda. Por último, el balanceo de carga puede atender a decisiones de la red troncal. Concretamente, se define un parámetro denominado RFSP (*RAT/Frequency Selection Priority*) que la MME proporciona al eNB a través de la interfaz S1 y que determina las preferencias desde el punto de vista de la red troncal a la hora de establecer prioridades de reelección de celda
 - El procedimiento de TLB balancea los usuarios que se encuentran en estado activo (RRC-CONNECTED), lo que supone la ejecución de un HO, que normalmente será *inter-frequency* o *inter-RAT*. Para interferir poco en la actividad del usuario, LB se debe tratar de aplicar durante periodos de inactividad del usuario (e.g., durante la recepción discontinua). La Figura 14 ilustra el concepto de TLB, donde se observa que se produce una distribución de las conexiones entre dos eNBs. En LTE este procedimiento es esencial debido a la naturaleza compartida del canal, ya que un incremento en el número de usuarios activos supone un descenso del *throughput* por usuario, y por lo tanto de la percepción del servicio del usuario. Algunos estudios revelan que, mediante un ajuste apropiado de los parámetros de HO orientados a conseguir balanceo de la carga, se puede conseguir hasta un 30% de mejora en el *throughput*.

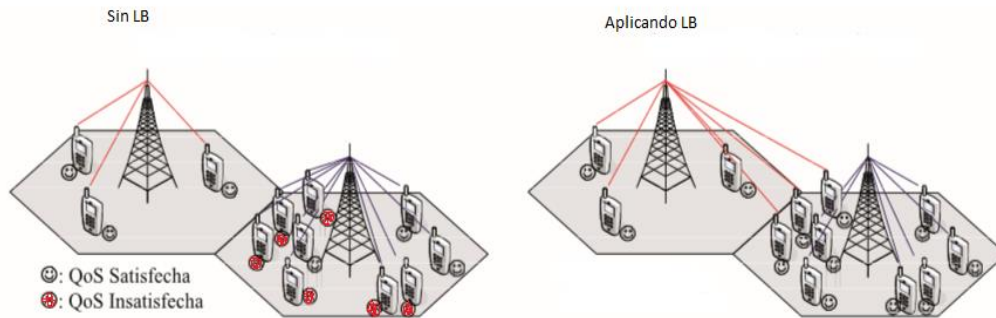


Figura- 14-Balanceo de carga[23]

2.6. Scheduling de paquetes

Consiste en asignar de forma dinámica recursos radio a los usuarios para que éstos puedan realizar sus transmisiones ordenadamente a través de la interfaz radio. Es el mecanismo responsable de determinar en cada momento, cuáles de las sub-portadoras se asignan a cada uno de los diferentes usuarios, o incluso a los diferentes flujos de información que pudieran existir de un mismo usuario, correspondientes a diferentes servicios. Mediante *scheduling* de paquetes en OFDMA resulta sencillo efectuar una asignación dinámica de las subportadoras disponibles a los diferentes usuarios simplemente modificando los símbolos que se inyectan a cada una de las entradas del proceso de IDFT en transmisión.[30] Esto permite que, en periodos muy cortos de tiempo, típicamente compuestos por un pequeño número de periodos de símbolo, se puedan modificar las sub-portadoras empleadas por cada usuario, lo que proporciona la flexibilidad necesaria para poder acomodar flujos de información con diferentes requerimientos de QoS.

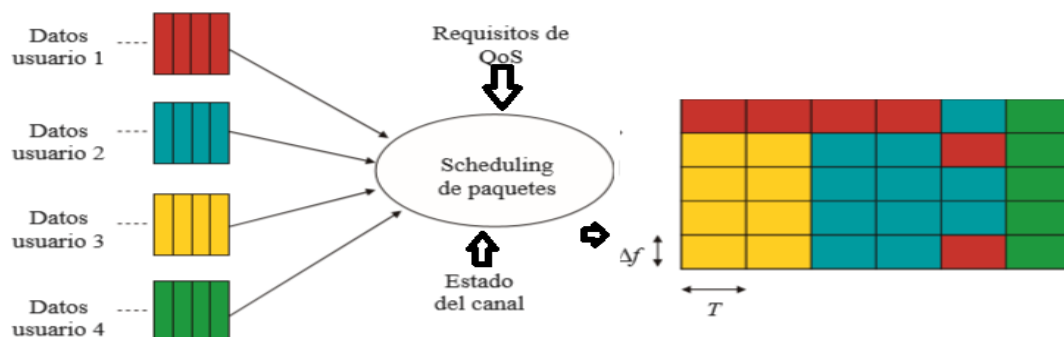


Figura- 15-Scheduling de paquetes[12]

El algoritmo de *scheduling* de paquetes tiene en cuenta dos aspectos siguientes:

- Calidad de Servicio (QoS) para los diferentes usuarios, en tanto que servicios que requieran de enviar más información deberán disponer de más sub-portadoras asignadas durante más tiempo.
- Información sobre el estado del canal para cada usuario en las diferentes sub-portadoras, de modo que se pueda evitar la asignación a un usuario de una subportadoras en la que se sabe que el canal presenta una elevada atenuación o interferencia.

El *scheduling* de paquetes en LTE conlleva varias sub-tareas como decidir, qué usuarios van a transmitir, en qué recursos de la interfaz radio, y con qué formato de modulación y codificación. La interfaz radio LTE define una rejilla tiempo-frecuencia de recursos radio, donde el mínimo recurso radio asignable a un usuario es un bloque de 180 kHz en una sub-trama de 1 ms,[31] denominado PRB (*Physical Resource Block*). En el dominio temporal, es posible explotar la llamada diversidad multiusuario, donde, debido a la existencia de varios usuarios, es más probable que alguno de ellos experimente una buena calidad del canal en una determinada sub-trama. Así, si el *scheduler* tiene en cuenta el estado del canal de cada usuario (*channel-aware scheduling*), podría asignar el canal al usuario con mejor calidad y de este modo se podría aprovechar mejor los recursos radio. Esta mejora por diversidad multiusuario es tanto mayor cuanto mayor es el número de usuarios y más rápidas son las variaciones del canal. LTE permite además extender este concepto al dominio de la frecuencia, donde ahora se tienen en cuenta las variaciones del canal debido a los desvanecimientos selectivos en frecuencia, y que son apreciables en los sistemas celulares donde el ancho de banda de coherencia es típicamente menor que el ancho de banda del sistema. El *scheduling* reside en el eNB, tanto para el DL como para el UL. Este mecanismo centralizado asegura ortogonalidad en las transmisiones, aunque requiere de señalización entre los usuarios y el eNB para reportar, entre otras cosas, el estado del canal y del *buffer*. [11]

En el enlace descendente, el *downlink scheduler* se encarga de decidir qué usuarios transmiten en el canal PDSCH, cómo se multiplexan sus canales lógicos (MAC *multiplexing*), y con qué formato de transporte (TF), que determina el tamaño del bloque de transporte (TB), y la modulación y codificación a emplear. Debido a las variaciones en frecuencia del canal, el *scheduler* podría asignar recursos a varios

terminales en una misma sub-trama. Para ello, el *scheduler* necesita que los terminales reporten el estado del canal mediante CSR (*channel status reports*). La decisión de *scheduling* se envía a los terminales a través del PDCCH, donde se detalla, para cada PRB, la identidad del terminal al que se le ha asignado el PRB y toda la información necesaria para que pueda decodificar el TB.

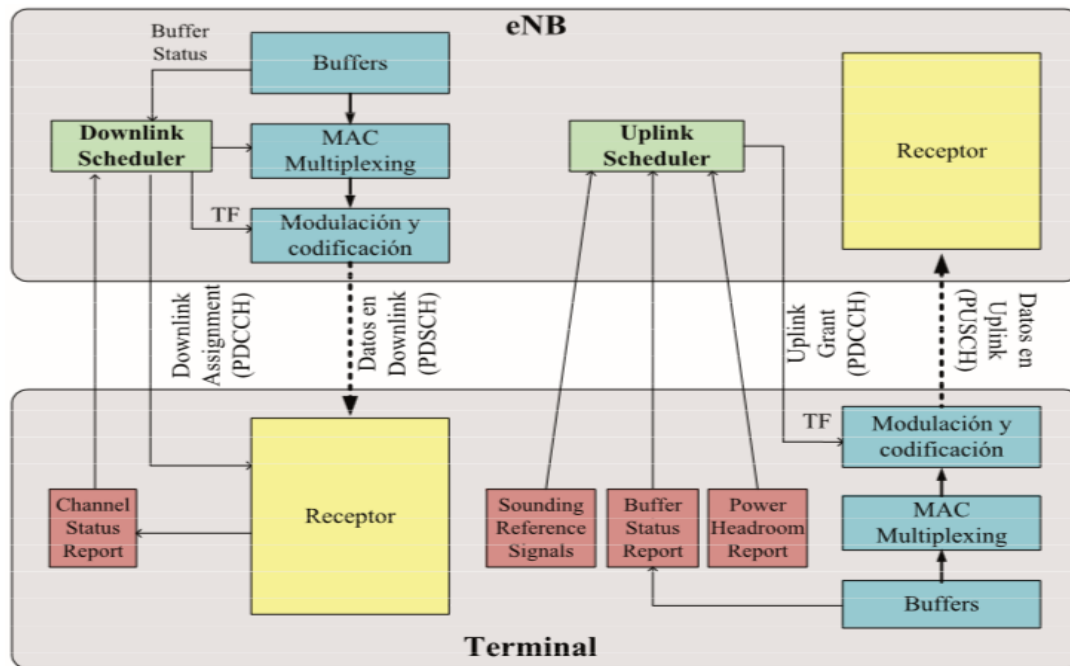


Figura- 16-Proceso de Scheduler[18]

En el enlace ascendente, de manera similar al enlace descendente, el *uplink scheduler* ubicado en el eNB determina qué terminales transmiten en el PUSCH en cada sub-trama y en qué PRB. Sin embargo, debido a las características del acceso radio en UL, basado en SC-FDMA, los PRB asignados a cada usuario tienen que ser contiguos en frecuencia. El *uplink scheduler* se encarga de seleccionar el TF que el terminal debería usar, mientras que las funciones de multiplexado de canales lógicos (*MAC multiplexing*) se realizan en el terminal. Tanto la decisión de *scheduling* como el TF seleccionado se comunican al terminal mediante los llamados USG (*uplink scheduling grants*). Estos mensajes son válidos para una sub-trama y, al igual que para las asignaciones en DL, se envían al terminal a través del PDCCH.[22] Por lo tanto, el *uplink scheduler* conoce de antemano el TF, y no es necesario que el terminal le indique esta información al eNB al hacer sus transmisiones, lo que reduce la señalización fuera de banda en UL. Sin embargo, para seleccionar adecuadamente el TF, el eNB necesita conocer con precisión el estado del canal, el estado del buffer, y la disponibilidad de potencia en el terminal.

2.7. Inter-Cell Interference Coordination (ICIC)

La funcionalidad de *scheduling* de paquetes asegurará la ortogonalidad entre las transmisiones de usuarios en una misma celda, pero no gestiona la interferencia entre transmisiones de usuarios conectados a distintas celdas. Esta interferencia intercelular podría llegar a ser especialmente notable en LTE, provocando una degradación sustancial de las prestaciones. La función ICIC se encarga de mitigar la interferencia intercelular mediante la coordinación de los *schedulers* en celdas adyacentes. Es decir, ICIC permite que las decisiones de los *schedulers* en cada celda se hagan teniendo en cuenta las transmisiones planificadas en celdas contiguas, tanto evitando hacer transmisiones simultáneas en el mismo recurso radio, como controlando la potencia de transmisión.[7] Esta coordinación es posible gracias a la existencia de la interfaz X2 de señalización entre eNBs.

2.7.1. Control de movilidad

La movilidad es una de las funcionalidades clave en los sistemas de comunicaciones móviles celulares, ya que permite a los usuarios acceder y recibir servicio desde cualquier ubicación geográfica donde el sistema disponga de cobertura. Para ello, el sistema proporciona una serie de procedimientos de movilidad que permite a los usuarios moverse con continuidad del servicio por el área geográfica cubierta. El principal objetivo de las estrategias de control de la movilidad es asegurar que los terminales se encuentran en todo momento en las mejores condiciones para comunicarse con el sistema, entiéndase mejores condiciones como aquellas impuestas, principalmente por criterios de calidad de la señal recibida, pero que podrían atender a políticas del propio operador. Estas funciones RRM gestionan la configuración de los procedimientos de movilidad, es decir, los procedimientos de re-selección de celda y actualización de la localización cuando el terminal se encuentra en estado RRC_IDLE (sin conexiones establecidas) y de traspaso o *handover* cuando el terminal se encuentra en estado RRC_CONNECTED (con conexiones establecidas con el eNB).[32]

2.7.2. Flexibilidad del espectro radioeléctrico

La interfaz radio basada en acceso OFDMA, permite una optimización de su uso por medio de técnicas de asignación dinámica de espectro DSA (*Dynamic Spectrum Assignment*). En LTE es relativamente independiente de la banda de despliegue y en principio se puede desplegar en las bandas ya identificadas para IMT-2000 como en otras nuevas bandas que puedan aparecer en el futuro. Tanto las bandas ya identificadas para LTE como futuras bandas pueden ser pareadas FDD (Duplexado por División en Frecuencia) o no pareadas TDD (Duplexado por División en Tiempo).[28] La flexibilidad del espectro es una de las características clave de LTE que a la hora de desplegar el sistema dentro de una determinada banda, donde idealmente cualquier ancho de banda puede ser usado (en pasos de 180 kHz correspondientes a la anchura de banda de un PRB. No obstante, para facilitar la operación, LTE define un subconjunto de anchos de banda posibles. En concreto, se permiten bloques de espectro con 6, 15, 25, 50, 75 y 100 PRB que se corresponden con anchos de banda nominales de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente. Nótese que el ancho de banda de estos bloques sería algo menor que el ancho de banda nominal debido a las bandas de guarda para reducir las emisiones fuera de banda. Esta flexibilidad en el ancho de banda en uso por parte de un operador permitirá, dentro del marco conocido como *spectrum refarming*, el despliegue gradual de LTE en bandas asignadas previamente a otros sistemas como GSM o UMTS. [33] Por ejemplo, en un despliegue GSM de 15 MHz con radiocanales de 200 kHz sería posible introducir LTE en tres etapas, donde en cada etapa se despliega LTE en una porción de aproximadamente 5 MHz de radiocanales GSM, a medida que decrezca el tráfico cursado sobre GSM. El anexo C se muestra las bandas de operación que se han identificado hasta el momento para LTE.

2.8. Despliegue de LTE en el mundo

El operador de red móvil puede expandir la capacidad de la red a través del despliegue de un mayor número de estaciones base, la disponibilidad de mayor cantidad de espectro o el uso de una tecnología más avanzada. La variable a preferir dependerá tanto de la viabilidad y flexibilidad que ofrezcan cada una de ellas así como de consideraciones económicas al respecto de las mismas. Por ejemplo, si un operador

podría acceder a mayor cantidad de espectro con un coste de las licencias bajo, ésta podría resultar sin duda la opción más atractiva para el operador. Por el contrario, si resultara que el coste de las licencias para la operación en nuevas bandas de frecuencia fuera muy elevado, podría resultarle más interesante explotar una nueva tecnología sobre las bandas que ya tuviera asignadas, siempre que la regulación lo permitiera.

En términos de despliegue de red, un aumento progresivo de la demanda se cubre con un aumento progresivo de estaciones base. De manera simplificada, podría decirse que, para unos valores de U [usuarios/Km²], T [bits/s/usuario], ancho de banda (B) [Hz] y eficiencia espectral (E) [bits/s/Hz] dados, el área de cobertura de una célula debería ser $S = (B \times E) / (U \times T)$ [Km²]. Antes de pasar a identificar diferentes componentes asociadas al despliegue que se espera jueguen un papel relevante en el contexto de LTE, conviene destacar el compromiso existente entre cobertura y velocidad de transmisión así como el impacto de la movilidad como elemento limitativo del despliegue.

Hay 18 países de América del Sur y el Caribe que ya lanzaron servicios 4G LTE. En Europa y Estados Unidos, ya se experimenta con 4G *Advance* (una versión mejorada), y en Corea del Sur trabajan sobre el 5G. La 4G permite ver un video en *YouTube* o una película en *Netflix* en un viaje en colectivo, entre otras cosas, como manejar la *notebook* o la PC desde el teléfono. “Este estándar tecnológico no es experimental, sino que está disponible en 97 países, donde suma 200 millones de usuarios. Este año se espera extender a un total de 150 países, y para 2016 llegar 915 millones de usuarios, según una previsión de *Digi World Institute*”. [8]

CAPÍTULO III: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE LTE

Introducción

En este capítulo se abordará el diseño de la propuesta para la solución y expansión de los servicios de telecomunicaciones utilizando la tecnología LTE en la isla de Santo Tomé, la cual incluye un análisis económico parcial de la propuesta. Luego del estudio de las principales características del estándar LTE, se determinó realizar una propuesta para la migración en el territorio que comprende la principal isla del país, con mayor énfasis para la capital donde se concentra un 70% del tráfico todo el país.[8] Dicha propuesta intenta dar cobertura a los lugares donde por años ha sido deficiente el servicio telefónico, en términos de servicio de transmisión de voz, datos y video. El despliegue de una red LTE es una excelente oportunidad de negocio para las empresas de telecomunicaciones en la isla ya que trae aparejado los beneficios inherentes a esta tecnología. Además, representaría un aumento de la capacidad de la red aumentando la velocidad de transmisión de datos e incluso la introducción de nuevos servicios.

3.1 Heterogeneidad en las redes

Las redes de comunicaciones resultantes donde se utilizan diferentes tecnologías radio para la provisión de los servicios se conocen como redes heterogéneas. La convivencia de redes de acceso radio de diferentes tecnologías constituye una característica inherente a la propia evolución de los sistemas de comunicaciones móviles. La adopción de nuevas tecnologías de radio pocas veces representa un proceso disruptivo sino que resulta habitual que diferentes soluciones formen parte de una misma infraestructura de red. Por tanto, la propia evolución y mejora de los sistemas de comunicaciones, junto con la utilización de las tecnologías más adecuadas en cada entorno de operación, conduce a la coexistencia de diferentes tecnologías de radio en los sistemas de comunicaciones móviles.

3.2 Propuestas de solución

El despliegue de un sistema de comunicaciones móviles para proporcionar cobertura a una determinada región se basa en la distribución de un conjunto de estaciones base o células por el territorio a cubrir, de modo que cada una proporciona la cobertura a los

usuarios de una zona geográfica, y entre todas las estaciones bases aseguran la cobertura de todo el territorio. Esto da lugar a lo que tradicionalmente se ha denominado un sistema celular, y que se ha venido empleando en todos los sistemas de comunicaciones móviles previos a LTE, en este caso particular las islas de STP, UMTS. A lo largo de este capítulo se propone un algoritmo para transición de la tercera hacia la cuarta generación, cuyo proceso se puede estructurar mediante pasos sencillos como actualizaciones de software en la unidad de radio, hasta pasos más complejos que exigen cambios y o actualizaciones de *hardware* en la parte de cómputo. Como se ha descrito, en el primer capítulo, los sistemas celulares se componen básicamente de tres unidades: equipo de usuario, red de acceso y red troncal. Es en la red de acceso donde se responsabiliza de sustentar la transmisión radio con los equipos de usuario de cara a proporcionar la conectividad necesaria entre éstos y los equipos de la red troncal. Los servicios de transmisión ofrecidos por la red de acceso para transportar la información de los equipos de usuario hacia y desde la red troncal son servicios portadores, es decir, servicios cuya finalidad última es la provisión de una cierta capacidad de transmisión. Esta parte de la red también es la responsable de gestionar el uso de los recursos radio disponible para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. La arquitectura genérica de red ha sido adoptada en las diferentes familias de sistemas celulares 2G y 3G, y también se mantiene en el sistema LTE. La separación entre la red de acceso y red troncal confiere un importante grado de flexibilidad al sistema de cara a soportar un proceso evolutivo en el que se puedan ir mejorando, agregando o sustituyendo las diferentes partes de la red con la mínima afectación posible al resto de la misma, de allí se propone las soluciones por partes divididas en unidades.

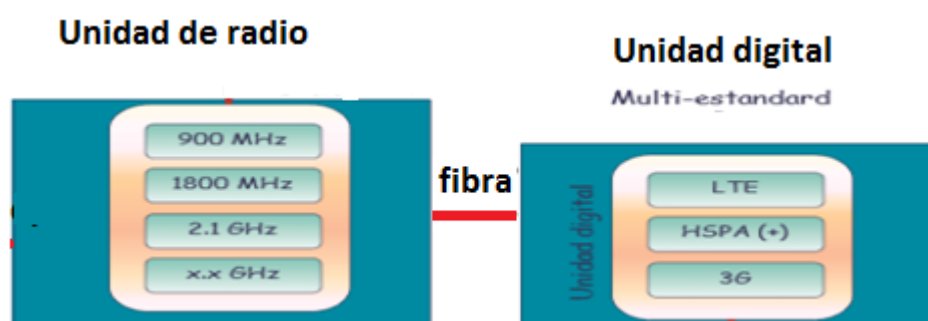


Figura- 17-División de sistema celular unidades[12]

Esta separación en la red permite implementar los cambios pertinentes para la transición de UMTS hacia LTE en cada unidad por separado como se propone a continuación.

3.3 Solución para la unidad de radio

En esta unidad los cambios pueden ser mínimos con tan solo reprogramación de *software*. Varias son las definiciones que le dan los distintos autores al concepto de SDR (Radio Definido por *Software*), pero todos convergen a la misma esencia en que le consideran como la forma mediante la cual permite cambiar el modo de operación de dispositivos de interfaz de radio a través de *software*. Las plataformas SDR, tanto en los terminales móviles como las estaciones base, cuentan con dispositivos reprogramables, como los DSP (Procesador Digital de Señal), y dispositivos reconfigurables, como las FPGA (Arreglo Programables Flexibles). Para un DSP esto supone el cambio del *software* que se ejecuta, para una FPGA el traspaso de un nuevo fichero de configuración. Cualquiera de los dos tipos de configuración cambia parcialmente o completamente la funcionalidad de la plataforma. El *software* que define la funcionalidad radio (o parte de ella) de una plataforma SDR es la aplicación SDR que consiste de varias funciones.[27]

Un dispositivo SDR consiste en un transceptor reconfigurable mediante *software*. Esto significa que debe ser capaz de recibir y transmitir en simultáneo y en todo momento, con las características establecidas mediante la interfaz de *software*. Ya que al lograr este nivel de flexibilidad implica un gran cambio en el diseño del *hardware* involucrado en el proceso de implementación tradicional de transmisores y receptores, es necesario tener claro, al menos a nivel conceptual, en la figura 18 se muestra a través del diagrama de bloques de las partes básicas y etapas de un dispositivo SDR.

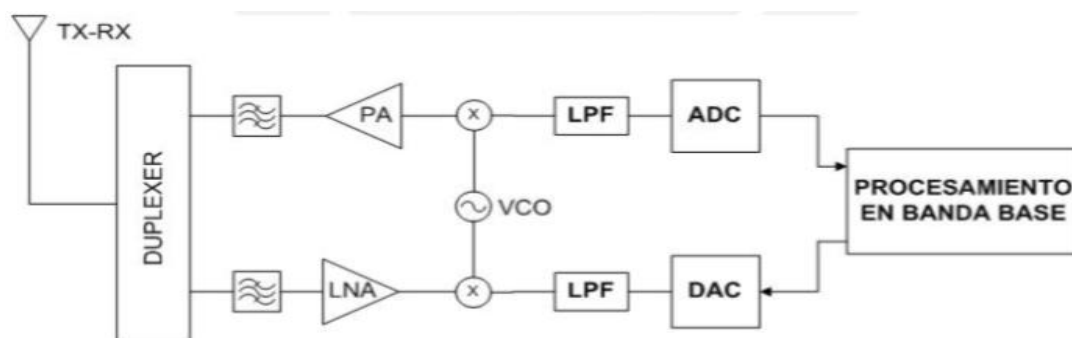


Figura- 18-Diagrama de bloques del dispositivo SDR[27]

En los bloques, la etapa de potencia de un *Front-End* de RF (Radio Frecuencia), tales como el Amplificador de Potencia (PA) en el transmisor y el Amplificador de Bajo Ruido (LNA) en el receptor, seguido del filtro pasa-banda que se coloca antes de la antena tanto en receptor como transmisor también estará presente en estos dispositivos. Las ganancias de ambos amplificadores deben ser configuradas y controladas mediante la unidad de procesamiento en banda base. Otro elemento importante en el esquema presentado en la figura, es el VCO (Oscilador Controlado por Voltaje) cuya función es mantener un mayor control sobre la frecuencia de la señal portadora que es básicamente el componente principal del *Front-End* de RF. Así se puede variar las bandas de transmisión y recepción del sistema SDR. Finalmente, los convertidores analógicos-digitales (ADC) para el receptor, y convertidores digitales-analógicos (DAC) para el transmisor. Estos dos elementos son los que permiten que todo el procesamiento de la señal sea complemente digital en la etapa de banda base. [34]Esto, a su vez, garantiza la versatilidad de todo el sistema pues el uso de sistemas digitales es lo que provee el nivel de flexibilidad y reconfigurabilidad a todo sistema de comunicaciones. Así, el procesamiento digital en banda base se encargará de ejecutar los algoritmos de modulación y codificación requeridos por el usuario, e interpretar las necesidades del mismo enviadas mediante el *software* de manejo del SDR. Un transceptor SDR debe permitir la manipulación de sus principales características a través de *software*. Entre estas características están:

- Selección de la banda de frecuencia.
- Asignación del ancho de banda.
- Configuración de los esquemas de modulación y codificación.
- Gestión de movilidad y manejo de Recursos de Radio.

De este modo se logra a través de los sistemas SDR obtener un dispositivo que sea multiservicio, multiestándar, multibanda, y en todo aspecto reconfigurable mediante una interfaz de software solamente.[22]

3.4 Propuesta de solución para la unidad digital

Se identifican las piezas fundamentales que componen la arquitectura de red de sistemas especificadas por 3GPP (UMTS y LTE). Esta identificación permite acotar de forma

clara cuáles son, y a qué criterios básicos de diseño obedecen, los nuevos componentes introducidos por el sistema LTE respecto a las redes UMTS. LTE ha sido diseñado para soportar despliegues de red donde coexistan E-UTRAN con otras arquitecturas de red.[4] La solución de interoperabilidad especificada para la provisión del servicio de conectividad IP a través de los diferentes accesos 3GPP con terminales *single-radio*, teniendo en cuenta, las diferentes prestaciones que pueden conseguirse en cada una de las redes de acceso en cuanto a latencias y tasas de transferencia en bps. Para tal proceso de transición se parte de dos principio que son: por un lado, la interoperabilidad posibilitando el *handover* entre redes UMTS y LTE limitada por características específicas de cada red; y por otro lado, es el caso en que se mejoran las prestaciones de UMTS agregándole nuevos componentes a las interfaces que conectan las dos arquitecturas (UTRAN/E-UTRAN).

3.5 Solución mediante utilización de interfaces propias de los sistemas.

La interconexión entre UTRAN y la red troncal EPC se realiza a través de la entidad de red SGSN (*Serving GPRS Support Node*). El nodo SGSN forma parte del dominio de paquetes GPRS y constituye el punto de entrada de la red troncal a los servicios GPRS ofrecidos a través de las redes de acceso UTRAN. El nodo SGSN integra tanto las funciones de plano de control como de plano de usuario para la provisión del servicio GPRS. UTRAN se conecta al SGSN mediante una interfaz denominada **Iu**. El nodo SGSN canaliza toda la señalización entre la red GPRS y el equipo de usuario relativo a las funciones de gestión de movilidad y gestión de las sesiones. Para ello, el nodo SGSN accede a la base de datos que contiene la información de los usuarios del sistema, denominada como HLR (*Home Location Register*) en GPRS, mediante la interfaz Gr. La interfaz Gr es una interfaz basada en el protocolo MAP (*Mobile Application Part*) y que se transporta sobre redes de señalización SS7.[7] Además del nodo SGSN, la implementación del servicio GPRS se sustenta en una entidad de red adicional denominada GGSN (*Gateway GPRS Support Node*). El GGSN es el nodo que interconecta la red troncal GPRS con la red externa de paquetes (*Packet Data Network*, PDN). Siguiendo la analogía con la red troncal EPC, la entidad GGSN de GPRS es equivalente a la entidad P-GW de EPC. La interconexión entre las entidades SGSN y GGSN se realiza mediante una interfaz denominada Gn a través de la cual se sustentan

los procedimientos de gestión de movilidad. La interfaz Gn también se utiliza entre SGSNs para sustentar el cambio de nodo SGSN en una conexión en curso.[5]

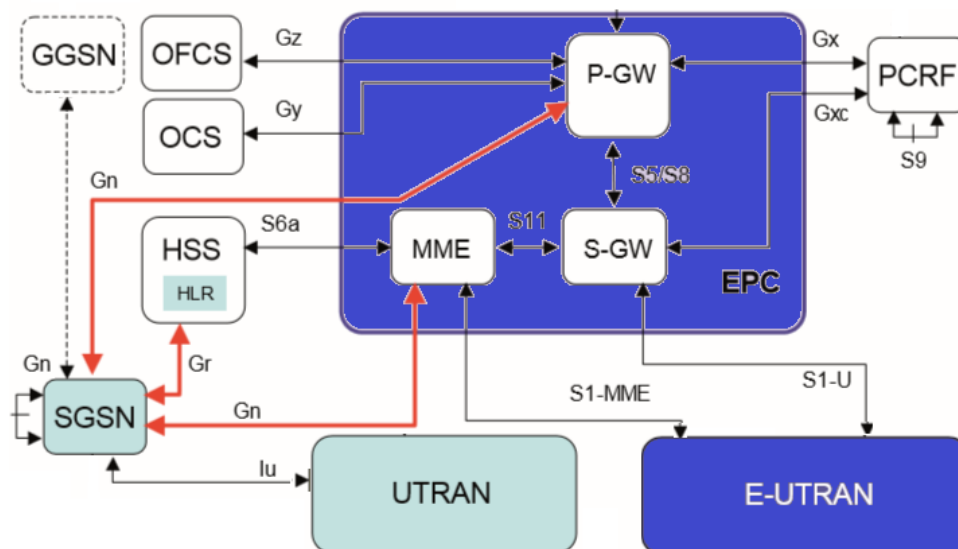


Figura- 19-Interoperabilidad entre UTRAN y E-UTRAN con interfaces propias del sistema[7]

Analizados los principales aspectos de los elementos e interfaces propias de GPRS, la solución de interoperabilidad se articula a través de las interfaces mostradas en rojo en la Figura 19. Mediante la reutilización de una interfaz **Gn** entre SGSN y la pasarela P-GW de la red troncal EPC, la pasarela P-GW es la encargada de realizar la función de punto de anclaje que permite la movilidad entre las redes de acceso 3GPP. Desde la perspectiva del acceso GPRS, la pasarela P-GW se comporta a todos los efectos como un nodo GGSN. Por tanto, a los terminales LTE/UMTS que accedan al servicio de conectividad a través de UTRAN, la red GPRS (el nodo SGSN) debe asignarles una pasarela P-GW en lugar de un nodo GGSN convencional. De esta forma, cuando los terminales duales tengan cobertura de la red de acceso E-UTRAN, el servicio de conectividad puede restablecerse a través de E-UTRAN manteniendo la misma pasarela P-GW para la interconexión con la red externa. El cambio de una red de acceso UTRAN a E-UTRAN comporta también el cambio de SGSN por las entidades de la red troncal EPC correspondientes. En este caso, dicho cambio se sustenta en la implementación de la interfaz **Gn** entre SGSN y MME. La entidad MME alberga el plano de control de la red troncal EPC y a través de ella, puede articularse el cambio hacia o desde la red de acceso E-UTRAN. La interfaz **Gn** es una interfaz basada en una versión del protocolo GTP (GPRS Tunneling Protocol), a diferencia de las interfaces internas del sistema LTE que utilizan una nueva versión del protocolo.[29]

El principio básico de funcionamiento de esta solución es que el servicio de conectividad IP de un usuario del sistema LTE que se conecte a través de las redes de acceso UTRAN (debido a, por ejemplo, falta de cobertura de la red E-UTRAN) se establezca a través de la pasarela P-GW apropiada (en lugar de una pasarela GGSN propia de GPRS). Para ello, el SGSN puede hacer uso del conocimiento de las capacidades del terminal en cuanto a qué tecnologías de acceso radio soporta en base a la señalización entre el equipo de usuario y la red. Asimismo, la red GPRS puede seleccionar la pasarela adecuada mediante la utilización del parámetro APN (*Access Point Name*) que forma parte de los datos de subscripción de los usuarios y que también se utiliza en GPRS. Nótese que el nodo SGSN accede a los datos de subscripción de usuarios LTE a través de la interfaz **Gr**, tal como se ilustra en la Figura#. Además de los datos de subscripción del usuario, en la base de datos HSS se mantiene información necesaria para la operativa del servicio. En este caso, entre los datos almacenados en el HSS se encuentra la información relativa a la red de acceso radio a través de la cual el usuario se encuentra accesible.

3.6 Solución mediante la incorporación de nuevas interfaces.

Esta solución se basa en el soporte de tres nuevas interfaces en la entidad de red SGSN. Estas interfaces son: S3, S4 y S6d. Las interfaces S3 y S4 son interfaces basadas en la misma versión del protocolo GTP que se utiliza en las interfaces internas de la red troncal EPC. En este caso, la interfaz S3 se utiliza para interconectar el SGSN con la entidad MME del plano de control de la red troncal EPC y la interfaz S4 se utiliza entre el SGSN y la pasarela S-GW que constituye el punto de anclaje del plano de usuario dentro de la red EPC. En la misma línea, la interfaz S6d es la adaptación de la interfaz S6a para el acceso a la base de datos HSS desde el dominio GPRS. El uso de esta interfaz basada en *Diameter* evita la necesidad de soportar la interfaz **Gr** basada en la señalización MAP/SS7 para el acceso al HLR. Además de estas tres interfaces, la solución planteada permite también la explotación de una interfaz directa entre UTRAN y la red troncal EPC denominada S12.[11]

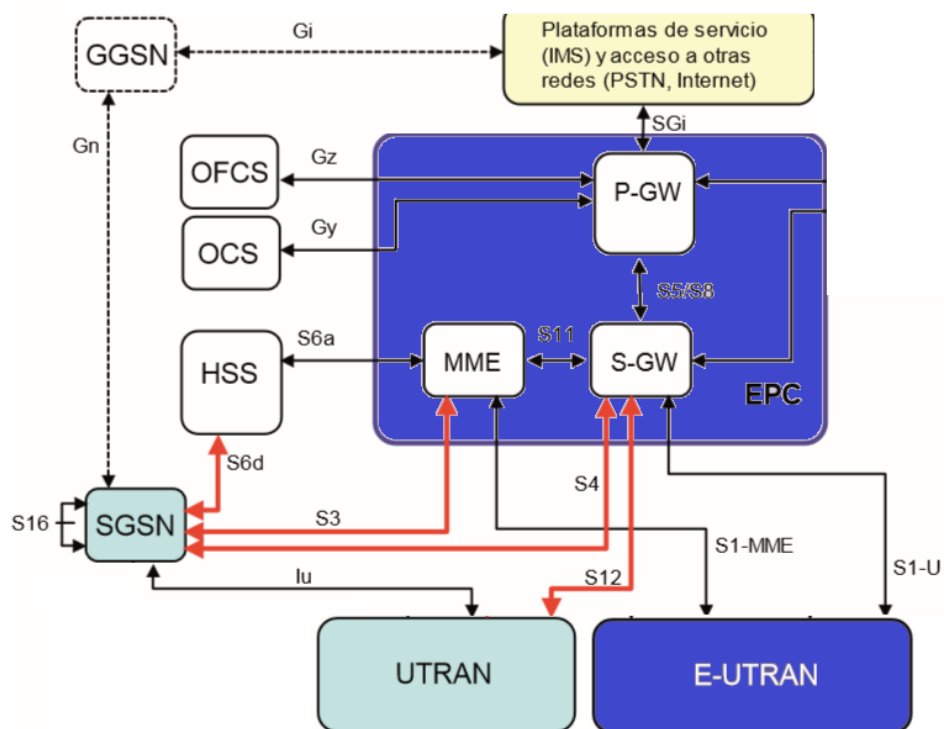


Figura- 20-Interfaces agregadas para interoperabilidad entre UTRAN y E-UTRAN[4]

Al igual que en la solución anterior, el punto de anclaje para garantizar la continuidad del servicio de conectividad IP sigue siendo la pasarela P-GW. Sin embargo, en esta solución se fuerza que todo el tráfico de los usuarios atraviese siempre una pasarela S-GW de la red troncal EPC, independientemente de la red de acceso utilizada. Así, para un usuario conectado a través de UTRAN, el plano de usuario transcurre a través de un SGSN y un S-GW hasta llegar a la pasarela P-GW. Esta opción es importante en escenarios de itinerancia donde la pasarela S-GW de la red visitada siempre constituye un punto de anclaje único de todo el tráfico de usuario. La utilización de un punto de anclaje único e independiente de la red de acceso en la red visitada facilita al operador de esa red la monitorización y control del tráfico que cursa un usuario en itinerancia. No obstante, la canalización del tráfico a través de una pasarela S-GW de la red troncal conlleva que el tráfico cursado a través de UTRAN sea procesado en un elemento de red adicional en comparación con la solución anterior de forma que la latencia de la red puede verse penalizada. En el caso de UTRAN, la utilización de la interfaz S12 permite reducir el número de saltos del plano de usuario de forma que se sorte el procesamiento del plano de usuario en el SGSN. [31] La interfaz S12 permite el establecimiento del túnel GTP entre el controlador RNC y la pasarela S-GW, evitándose que el tráfico transcurra

El BBU se alimenta a través del módulo de potencia y se conecta al RRU mediante fibra óptica. En este último se efectúa la conversión de las señales ópticas a eléctricas y se realizan las funciones de RF relacionadas con el sistema instalado. Finalmente, el RRU se conecta a través del alimentador al conjunto de antenas donde se irradia la señal.

El módulo de RF puede operar en tres modos de transmisión: independiente, combinado y en modo PBT. El modo PBT presenta el mismo esquema que el modo combinado pero con una mejora en la potencia de transmisión. La robustez de esta solución está asociada al ambiente externo que debe soportar. Por su parte, la configuración dinámica de los elementos dentro del gabinete permite ajustarse a las necesidades de cada situación. Se introduce en la red el controlador de estaciones base BSC6000, el cual será responsable de las funciones de operación, gestión, mantenimiento y control de los recursos de red. Entre sus principales características están:

- Diseño sobre la plataforma *All IP*, soporte para operación BSC/RNC.
- Elevada integración: 0.48 m2 para 2048 transmisores, PCU y TC integrado.
- Capacidad: 2048 transmisores, que pueden usar todos canales de tasa media (half rate)
- Bajo consumo de potencia: 960 W, 1024 transmisores.
- Módulo GDPUX que procesa 960 canales para TDM y 3740 canales para IP.
- Tarjeta GDPUP para el procesamiento del servicio de paquetes que soporta 1024 PDCH, 100%MCS9.
- Tarjeta GPEUG para la interfaz GB, que soporta 32E1/T1, 64 Mbps para GB.
- Interfaz IP con unidad de procesamiento que soporta 384 transmisores para *Abis*, 8 FE, 2 GE.
- Plataforma de software ROSA (*RASE Open Service Architecture*)

En la figura 22 se muestra la migración entre tecnologías a partir de la representación gráfica de un segmento del BSC6000.

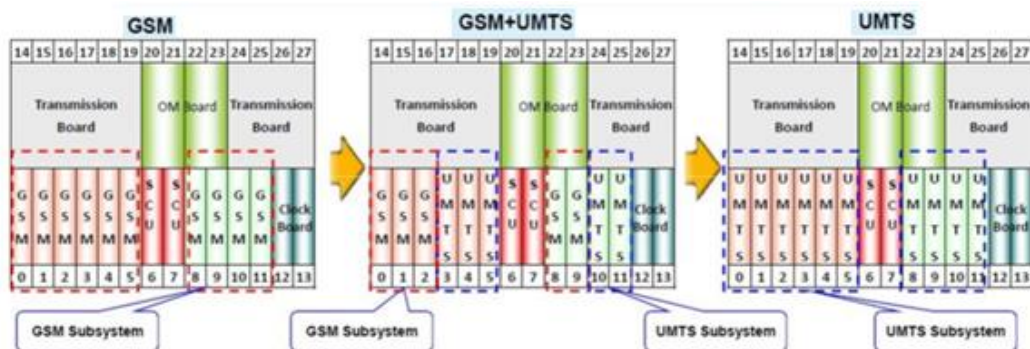


Figura- 22-Segmento de estación base BSC6000[7]

El fabricante concibe el proceso de modernización de las redes por etapas o fases. En principio, la transición se justifica por el hecho de que los equipamientos de estándares predecesores exhiben un rendimiento pobre en cuanto a prestaciones, ocupan gran cantidad de espacio y la red se hace innecesariamente compleja debido al número de elementos que la componen. La etapa inicial requiere el montaje de nuevo gabinete de distribución para conformar una red simple de alto rendimiento sustituyendo algunos gabinetes antiguos por los BTS de cuarta generación. El diseño en *stack* del equipamiento moderno permite aumentar la capacidad de la red aprovechando la misma área de instalación.

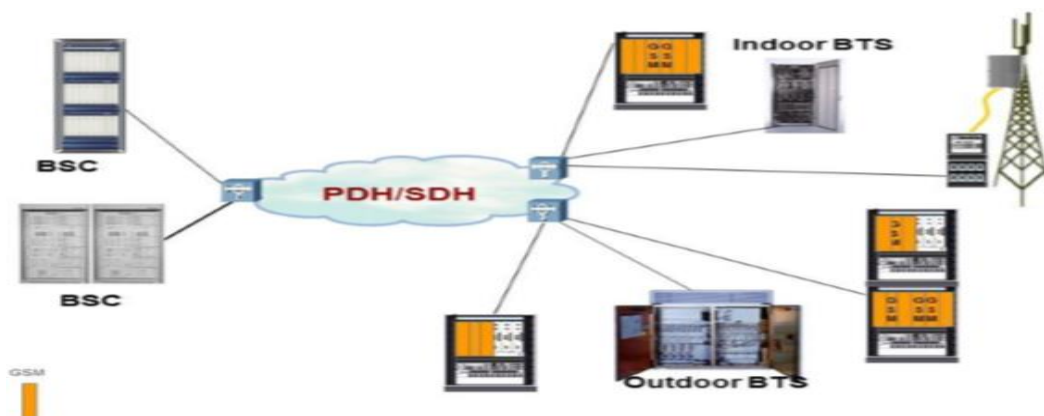


Figura- 23-Red con BTS de cuarta generación[7]

La siguiente fase consiste en la modernización del *backhaul* con *carrier ethernet* permitiendo la introducción de infraestructura para soportar el transporte IP. En esta etapa se desmontan los restantes BTS heredados. Paralelamente, se conectan algunos equipos directamente a la red de transporte IP y se separan de la infraestructura de transporte PDH/SDH.[7]

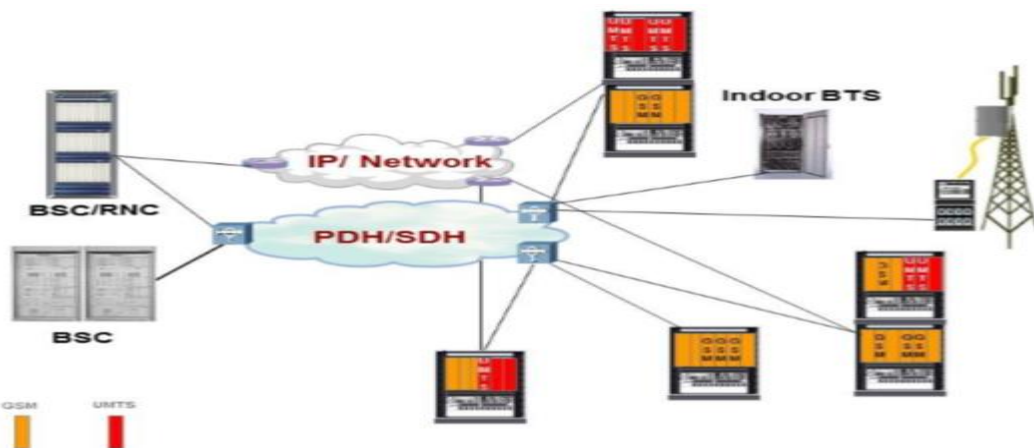


Figura- 24-Separación en la infraestructura de transporte[7]

Una vez alcanzada esta fase, es posible dar el salto definitivo hacia el próximo nivel en la evolución de los sistemas móviles. La red TDM es convertida a *All IP* transitando de UMTS hacia LTE.

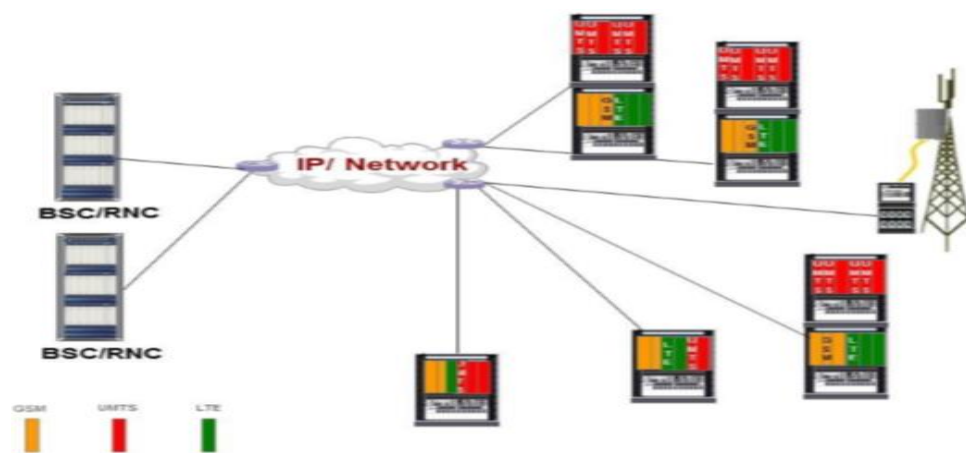


Figura- 25-Red de cuarta generación con soporte para todo IP[7]

3.8 Propuesta de solución del fabricante Ericsson

El fabricante sueco presenta las estaciones base de la serie 6000 que están constituidas por distintos elementos y divididas en unidades digitales (DU) y unidades radio (RU) o unidades radio remotas (RRU). Una DU realiza funciones de conmutación, control de tráfico, temporización, procesamiento de banda base y provee una interfaz radio, mientras que el propósito principal de una RU es enviar y recibir señales. Básicamente, La RU recibe datos en forma digital y los convierte en señales analógicas y viceversa.

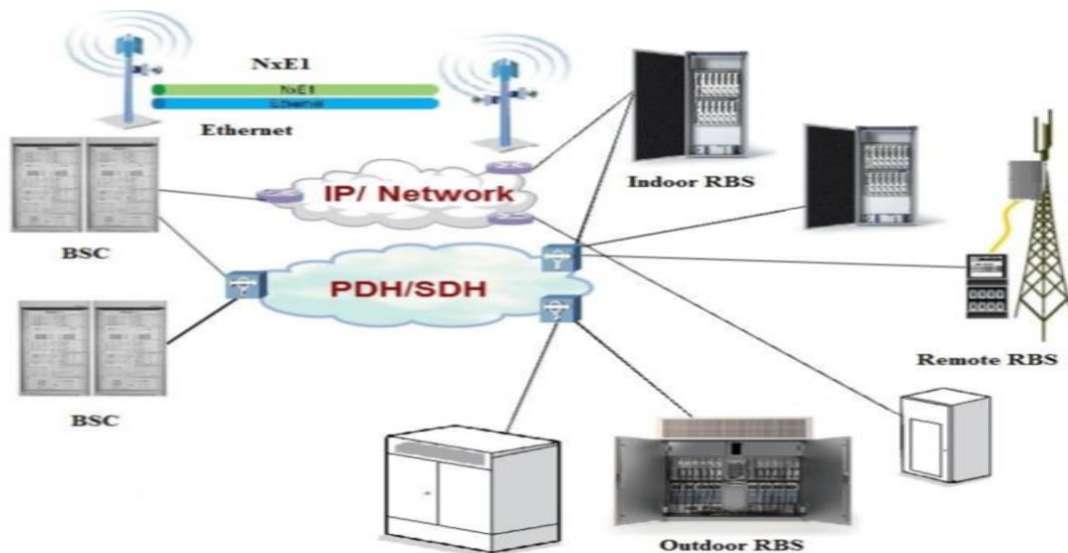


Figura- 26-Arquitectura de red de cuarta generación propuestas por Ericsson[7]

La solución propuesta por el fabricante Ericsson se muestra en la figura anterior. Se aprecia que la arquitectura de la red está diseñada para soportar el *backhaul* tanto de fibra óptica como por enlace de microonda.

En el proceso de configuración e instalación de una RBS (*Radio Base Station*), las DU pueden combinarse entre sí para conformar bloques DBB (*Digital Building Blocks*), mientras que por su parte, las RU también pueden conectarse mutuamente en bloques RBB (*Radio Building Blocks*). Los DBB consisten en una o dos DU que tienen conexiones definidas con los RBB en cada sector. Los RBB, en cambio, son formas únicas de combinar RU o RRU en un sector. Un RBB define la capacidad para un sector y las conexiones al sistema de antenas y a las DU. Las configuraciones radio se construyen mediante la combinación de DBB y RBB, es decir, son formas específicas de conectar las unidades dentro de la RBS. Dicha configuración define la capacidad de la estación base en términos del número de sectores, características de diversidad y potencia de salida. La RBS 6201 es un macro nodo *indoor* introducido en el mercado por Ericsson que tiene entre sus principales características el soporte de GSM, WCDMA y LTE de manera individual, aunque también consta del modo MSSM (*Multi-Standard Single Mode*) para operar dos sistemas de acceso radio simultáneamente, además consume poca energía eléctrica y tiene soporte de IP.[32] La radio base completa se instala en un gabinete dividido internamente en dos compartimentos. Dicho gabinete tiene las dimensiones estándar de una radio base para interiores y puede ser configurado con un máximo de 12 unidades radio y 4 unidades digitales. En esta

configuración, el gabinete tiene una capacidad máxima para soportar 48 transmisores. El modo MSSM mencionado anteriormente permite configurar la RBS con dos sistemas de acceso radio dentro del mismo gabinete. De esta forma, los sistemas de acceso quedan separados en dos nodos independientes, de los cuales uno debe ser siempre configurado como primario y el otro como secundario. Cada nodo se gestiona empleando sus propias herramientas de estándar radio, pero solo el nodo primario controla y supervisa el sistema de soporte (módulo de enfriamiento, disipadores de calor, etc.). El RBS 6102 es una solución para exteriores, las prestaciones son similares al modelo de interiores 6201 con la diferencia fundamental en la robustez del gabinete, ya que debe soportar condiciones climáticas severas.[10]

3.9 Implementación de las propuestas mediante simulación con *Atoll*.

Para la validación de todo lo anterior expuesto, en los epígrafes siguientes se describe los pasos necesarios para implementar parte de las soluciones presentadas mediante la simulación en programas específicos para diseño de redes.

3.10 Software *Atoll*

Atoll es un *software* que permite a los operadores de telecomunicaciones realizar el diseño y planificación de sus redes, con la posibilidad de estudiar el comportamiento de las mismas para su optimización. Este programa cuenta con herramientas de cálculo de propagación de altas prestaciones, soporta redes multicapas y jerárquicas, modelado de tráfico, planificación de frecuencias y códigos e incluso optimización de la red. En el presente trabajo se usa la versión 2.8.0.2. Soporta tecnologías de varios estándares de comunicación móvil e inalámbrica, permitiendo planificar redes híbridas. También 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. Soporta datos geográficos de varios formatos y de diversas resoluciones. Es necesario recopilar toda la información necesaria en cuanto a los equipos de radiocomunicaciones (emplazamientos, transmisores, antenas, etc.), información de la tecnología radio (bandas de frecuencias y otros parámetros específicos de la tecnología a implementar) e información geográfica (*clutter classes*, *clutter heights*, mapas de

tráfico, etc.) que se utilizará en el despliegue. [35] Para el diseño de la red de la zona en estudio es necesario incorporar mapa de altimetría (*heights*) que contiene información topográfica del relieve de la zona en estudio y poseer el mapa *clutter* que brinda información del uso del terreno que se utiliza para cálculos de cobertura y propagación. Para la obtención de estos dos mapas se utiliza el *software Global Mapper*, en su versión 14.0.3.[16]

3.11 Algoritmo de diseño de una red LTE

Para el diseño de la red que se quiera implementar, el *software* cuenta con plantillas basadas en algoritmo con pasos o etapas bien definidas en forma de ayuda a la que se puede recorrer de modo que la red diseñada tenga mayor consistencia. En el diagrama mostrado a continuación figuran los pasos a tener en cuenta para la planificación de la red.

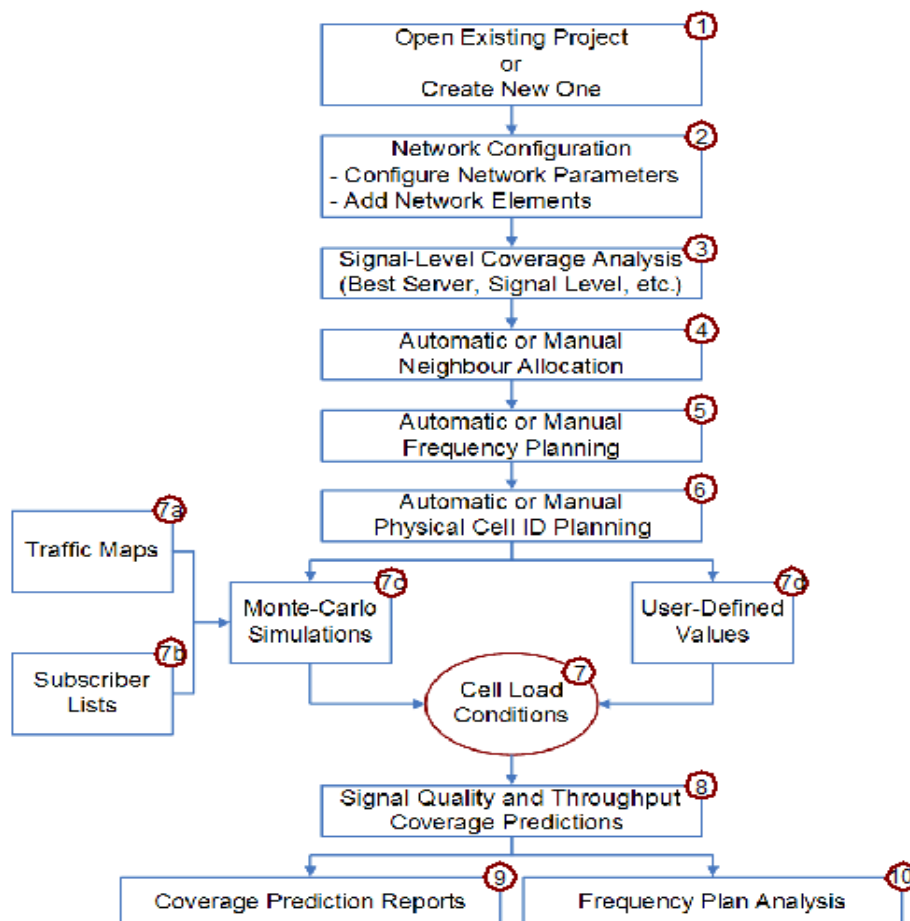


Figura- 27-Algoritmo de diseño de una red LTE[35]

Básicamente el diagrama se estructura en diez bloques con pasos secuenciales y consecutivos que la ayuda del *software* sugiere y que el planificador de la red debe tener en cuenta en función de los objetivos que persigue. Algunos de estos pasos son iterativos para comprobar la consistencia de la red y o verificar la modificaciones efectuadas a lo largo de la planificación.

3.12 Configuración de los parámetros

El programa brinda una facilidad de configuración de los parámetros a través de las varias ventanas disponibles en dependencia del modelo o tipo que red que se quiera diseñar. Por defecto el programa brinda algunas configuraciones básicas agrupadas por carpetas y subcarpetas modificables según el criterio de diseño de cada planificador.

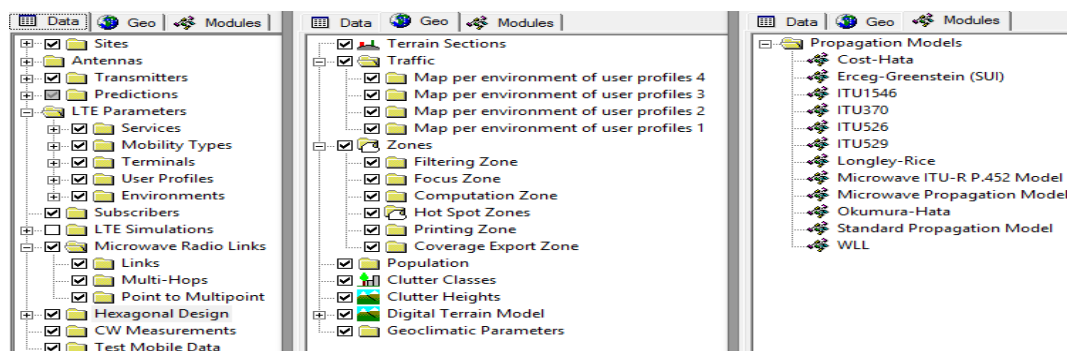


Figura- 28-Parámetros de configuración en Atoll

En el caso de que el diseño sea de una red de comunicación celular como LTE, los principales elementos constituyentes son: las antenas, estaciones bases y equipo de usuario que en conjunto conforma lo que comúnmente se nombra transmisores. A su vez, el conjunto compuesto por sitios, celdas y transmisores son representados con sus siglas provenientes del inglés BTS y estos agrupados forman la llamada red celular. En las antenas se selecciona el modelo del fabricante *Kathrein* que coincide con el que *Atoll* trae por defecto. Los principales parámetros y sus respectivas configuraciones fueron: polarización vertical, ganancia en 18 dBi, *Xpool* para la diversidad espacial y el número de puertas utilizadas para los transmisores y receptores fueron 4 y 2 respectivamente. En los transmisores se le puede asignar un nombre o dejarlo por defecto, pero se recomienda no modificarlo de modo que el *software* pueda actualizarse automáticamente en el caso de que se haga alguna modificación posterior a la creación del proyecto, seleccionar el equipamiento TMA (*Tour Mouneten Amplifier*) y BTS,

especificar la longitud del alimentador tanto en transmisor como en el receptor para que el que el programa calcule las pérdidas de conector y de alimentador. Con el mismo procedimiento el programa calcula la figura de ruido y la ganancia en el TMA. En las celdas se especifican los siguientes parámetros descritos a continuación precedidas de las configuraciones que se seleccionaron entre paréntesis: modelo de propagación (*Satandar Propagation Model*), resolución (10 m), radio de propagación (5.000 m), banda de frecuencia (925FDD-10MHz/8), la máxima potencia (de 40 a 48 dBm), el algoritmo de *scheduler* (*Propotional fair*) y el número máximo de usuario, son algunos de los principales parámetros a introducir por el planificador de la red, los demás parámetros se puede dejar a elección por defecto asignado por el *software*. Para el equipo de usuario, se deja la configuración a elección del planificador dado que puede existir una vasta gama de variedades, y solo tendrían que definirse estos, cuentan con tecnología MIMO, la potencia de transmisión que puede variar en el rango de -40 a 23 dBm y la figura de ruido que para el estándar LTE, *Atoll* fija el valor en 8 dB por defecto. Otras configuraciones que también se deben seleccionar para la simulación están relacionadas con los tipos servicios y movilidades, perfil de usuario y el entorno. Estos valores cambian según el estudio que se quiera realizar mediante las simulaciones. Como un ejemplo se puede mencionar la elección del perfil de usuario: *Business*, lo que implica el uso de los servicios de *ftp*, *VoIP*, *web* y video conferencia. El tipo de movilidad se fija a una velocidad de 70 km/h, corresponde a entornos rurales y suburbanos.

3.13 Parámetros de diseño de la red.

Inicialmente se trata de implementar el diseño de la red actual desplegada en la isla con base a información de las ubicaciones de los emplazamientos, como se muestra en la figura 29. La exploración de perfiles realizada muestra que la mayoría de los sitios de telecomunicaciones existente se encuentran bien ubicadas, sin embargo algunos sitios se encuentran en lugares inapropiados ofreciendo escasa línea de vista a los asentamientos poblacionales de sus alrededores, además no son suficientes sitios para dar cobertura a todos los pueblos de la zona.

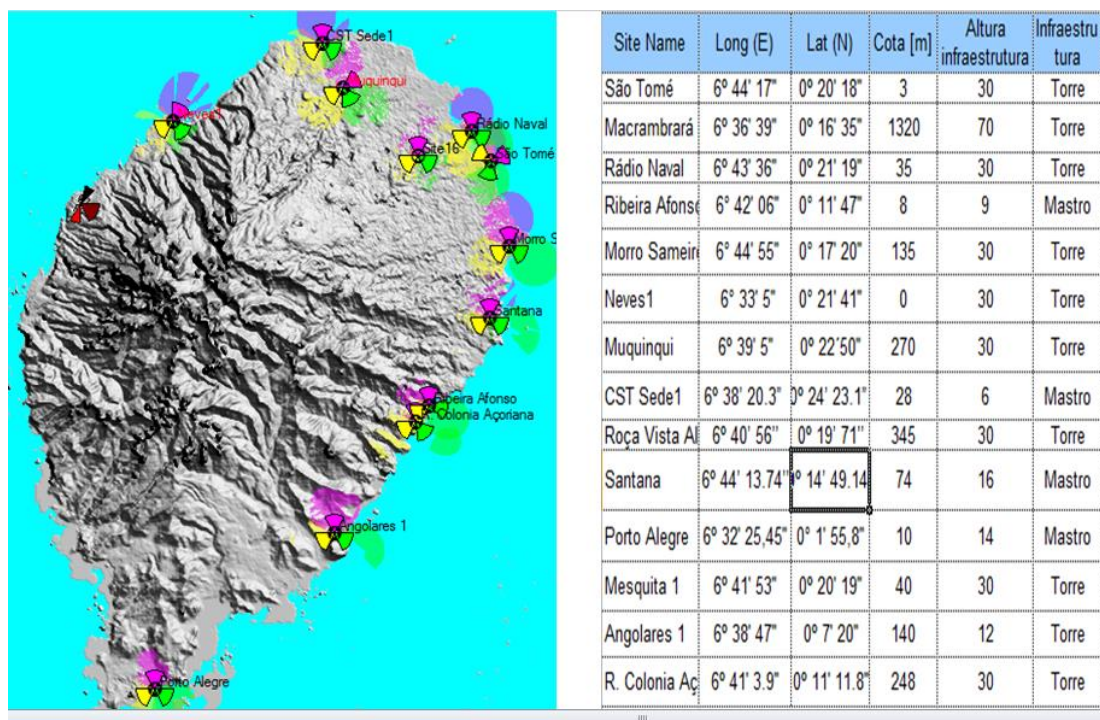


Figura- 29-Mapa de cobertura inicial en Santo Tomé

Se aprecia que es pobre el área de cobertura de los transmisores de la red actual, dejando una gran parte de la isla sin cobertura. Si bien es cierto, por el relieve del terreno que presenta la isla (con picos de más de dos mil metros de altitud) condiciona en gran medida el despliegue de las estaciones bases imposibilitando cobertura en todas las zonas, pero bien se puede hacer algunas modificaciones en las configuraciones de los equipamientos con vista a mejorar el desempeño y poder en la medida de posible, cubrir al menos las zonas de mayor interés. El mapa de la figura 30 muestra las localidades mayor interés que en la mayoría de los casos son pequeños pueblos ubicados en la periferia y cuya población se dedica principalmente a actividad de pesca artesanal. Nótese que resaltado en color verde, se identifica las localidades de interés más escasas en cuanto a alcance de las telecomunicaciones, por lo que se hace necesario proponer más puntos adicionales de radio bases.

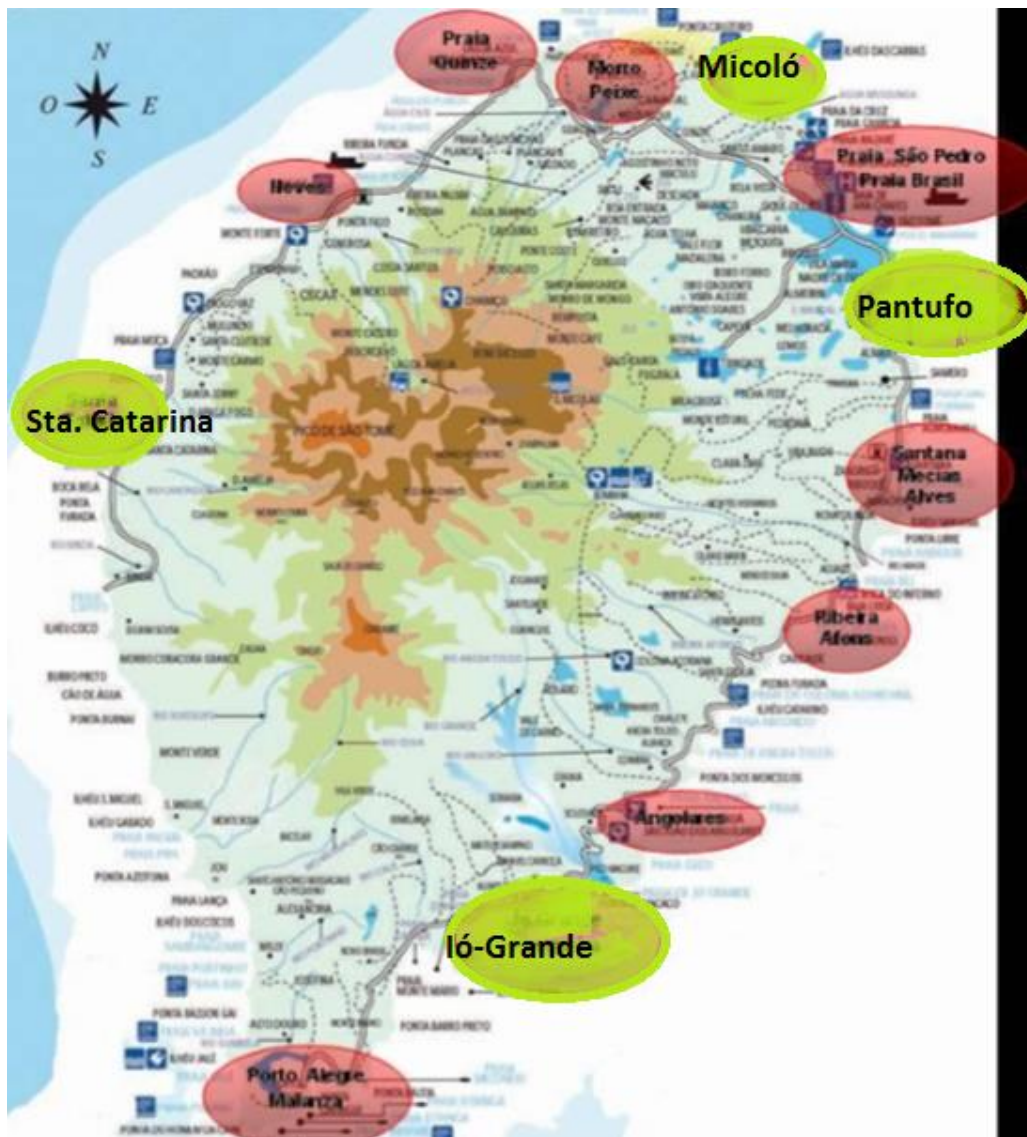


Figura- 30-Localidades de interés en dar cobertura[1]

Una vez identificadas las localidades de mayor interés en las que se quiere dar cobertura y extender las infraestructuras de las telecomunicaciones, se procede con las modificaciones pertinentes, valiéndose de los recursos disponibles para intentar reducir los gastos (CAPEX). En este sentido, luego de reiteradas simulaciones se constata que muchas estaciones bases se encuentran a bajas alturas sobre el nivel medio del terreno lo que afecta en gran medida la propagación de la señal debido básicamente a los obstáculos relacionados con el relieve. Con perspectiva de superar estos obstáculos, se procede a aumentar las alturas de algunas torres hasta despejar el porcentaje necesario de la primera Zona de Fresnel. En busca de un incremento de la cobertura de las estaciones aparejado al incremento de altitud de las torres, se decide además incrementar la

potencia de transmisión en algunos emplazamientos. Para el manejo de las potencias de transmisión en el transmisor, el estándar LTE define algunos valores típicos en dependencia del tipo de la antena, banda de frecuencia, y si se dispone o no de licencia para transmitir a la máxima potencia. La diversidad de transmisión utilizada para el caso de MIMO y el número de sectores, también juegan un papel importante en la selección de la potencia de transmisión con perspectiva a controlar la exposición a campos electromagnéticos (*EMF-Electromagnetic Field*).[33] Los fabricantes recomiendan los valores máximos y mínimos admitidos para potencia en sus equipamientos a través de las hojas de datos (*datasheet*). En el diseño de esta red, los valores utilizados fueron obtenidos a partir de la recomendación sugerida en la hoja de datos adjunta en el anexo B, del fabricante **Ericsson** que impone un límite máximo de potencia de salida en sus transmisores de 60 W con las RBS de las **series 6000**. Aún con estas modificaciones todavía la red se ve penalizada en cuanto a área de cobertura, limitando en gran medida los servicios que se podría ofrecer, lo que impulsa a la introducción de nuevas estaciones bases en las localidades más carentes. Se agrega cuatro estaciones bases en las localidades de Santa Catarina, Pantufo, Ió-Grande y Micoló con la particularidad de que estas, deben cumplir con los siguientes requisitos y objetivos:

- Lograr los objetivos propuestos en materia de cobertura es decir, permitir comunicación en los lugares para los cuales fue propuesta.
- Priorizar los asentamientos en dependencia de su importancia.
- El lugar debe contar con condiciones para poder realizar el montaje de una estación: suelo firme que permita la instalación de mástiles o torres auto-soportadas y las obras civiles asociadas, área libre de vegetación elevada, clima tranquilo, etc.
- Estar ubicada cerca de una instalación de cables de fibra óptica o con línea de vista a otra estación superior para el transporte de la comunicación.
- Tener una vía de acceso asequible cerca, al menos a una distancia prudencial que permita su instalación y posterior operación técnica.
- Estar ubicada cerca de instalaciones de energía eléctrica para su alimentación y no tener cerca fuentes de interferencias radioeléctricas.

Las nuevas posiciones para radio bases se proponen utilizando el mapa topográfico de Atoll, de manera que se pueda dar cobertura a la mayor cantidad de asentamientos

posible, explorando nuevos sitios que satisfagan la primera de las premisas mencionadas. Luego, el lugar escogido es referenciado en un mapa topográfico y se observa si es accesible y en qué forma. Por último, se requiere la visita al sitio (apenas se menciona para información general) para confirmar el cumplimiento del resto de los aspectos y la evaluación final de factibilidad de la ubicación.

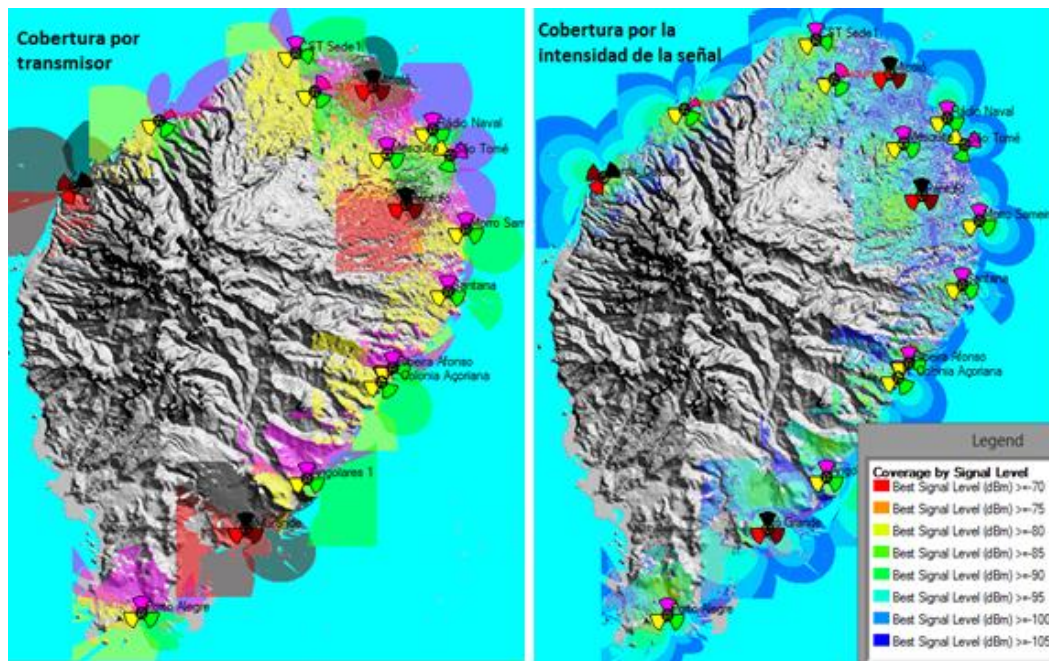


Figura- 31-Mapa de cobertura por transmisor

También se procede con la configuración del ángulo de radiación en cada sector de los transmisores a través del ajuste del azimut. Las mejoras alcanzadas son perceptibles a simples vista, al menos en cuanto el área de cobertura de los transmisores y en el nivel de la intensidad de la señal. De forma resumida estas mejoras se aprecian en el informe proporcionado por el *software Atoll* en la tabla que se muestra a continuación comparando los resultados obtenidos de las simulaciones de la red original inicial con la modificada, logrando un incremento de más del doble en cuanto al área de cobertura.

También se procede con la configuración del ángulo de radiación en cada sector de los transmisores a través del ajuste del azimut. Las mejoras alcanzadas son perceptibles a simples vista, al menos en cuanto el área de cobertura de los transmisores y en el nivel de la intensidad de la señal. De forma resumida estas mejoras se aprecian en el informe proporcionado por el *software Atoll* en la tabla que se muestra a continuación

comparando los resultados obtenidos de las simulaciones de la red original inicial con la modificada, logrando un incremento de más del doble en cuanto al área de cobertura.

Red original				Red modificada				
Name	Surface (km²)	% of Covered	Height	Name	Surface (km²)	% of	Height (m)	Azimuth (°)
Coverage by Trans	223,283	100		Coverage by Tran	556,5481	100		
Angolares 1_1	9,3691	4,1961	140	Angolares 1_1	19,1427	3,4395	240	0
Angolares 1_2	16,8803	7,56	140	Angolares 1_2	31,1874	5,6037	240	120
Angolares 1_3	4,9793	2,23	140	Angolares 1_3	6,8283	1,2269	200	240
CST Sede1_1	1,6439	0,7362	28	CST Sede1_1	4,3578	0,783	28	0
CST Sede1_2	1,3208	0,5915	28	CST Sede1_2	16,4912	2,9631	150	100
CST Sede1_3	1,8017	0,8069	28	CST Sede1_3	18,6188	3,3454	120	240
Mesquita_1	2,0403	0,9138	40	lô Grande_1	26,7501	4,8064	250	0
Mesquita_2	2,2528	1,0089	40	lô Grande_2	18,6991	3,3598	50	120
Mesquita_3	2,6685	1,1951	40	lô Grande_3	29,7203	5,3401	200	240
Morro Sameiro_	17,6079	7,8859	135	Mesquita_1	7,8518	1,4108	120	0
Morro Sameiro_	20,7245	9,2817	135	Mesquita_2	8,142	1,4629	120	120
Morro Sameiro_	9,0063	4,0336	135	Mesquita_3	20,5758	3,697	200	240
Muquinqi_1	22,1439	9,9174	270	Micolô_1	8,3987	1,5091	70	0
Muquinqi_2	16,0727	7,1984	270	Micolô_2	6,9309	1,2453	70	120

Tabla 2-Comparativa entre la red original y la modificada

Las modificaciones introducidas en el diseño de la red, guardan relación con el objetivo que se quiera lograr por parte del planificador de red de acuerdo a las necesidades locales, de este modo a título de ejemplo, nótese para en el transmisor Neves, localizado en el noroeste de la isla, se trata de dar cobertura principalmente a lo largo de la carretera y para eso se reduce el ancho del patrón de radiación en los puntos de mitad de potencia a un ángulo de 30 *deg*, con una inclinación mecánica a 0 *Tilt*. Esta modificación estrecha el patrón de radiación del transmisor reorientándolo hacia la carretera como se puede apreciar en las figuras que se muestran a continuación.

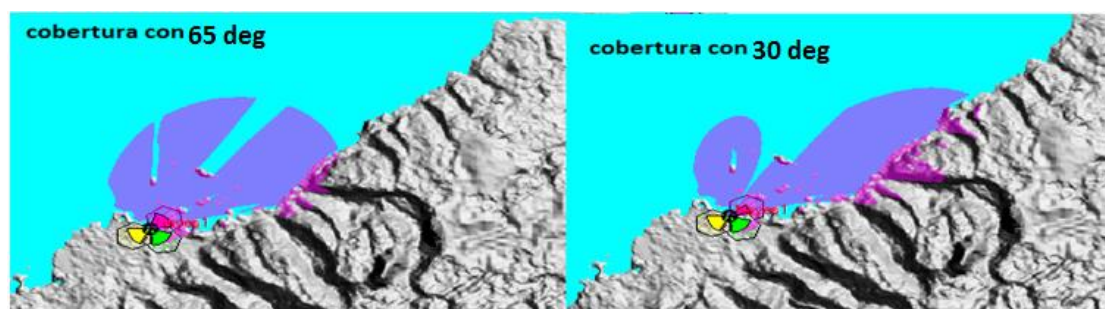


Figura- 32-Comparativa entre las áreas cubiertas

3.14 Solapamiento e interferencia de las señales.

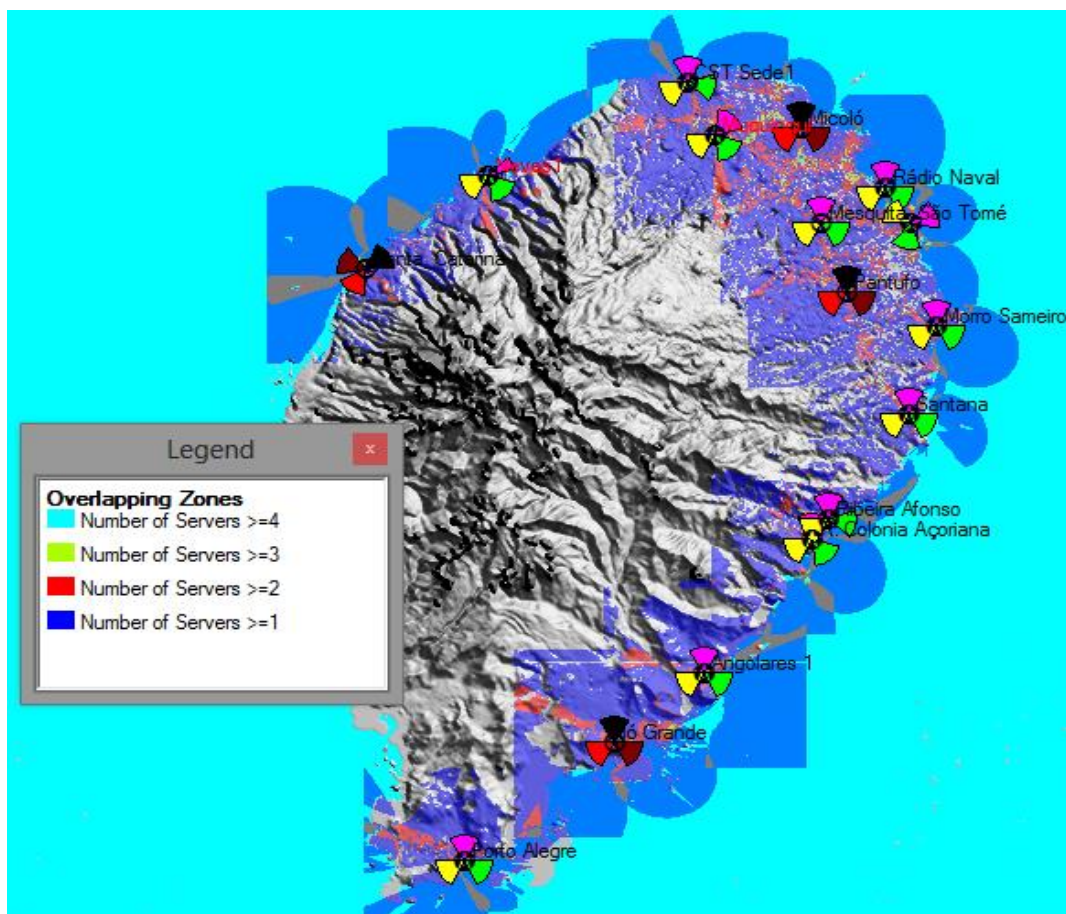
Las modificaciones introducidas en la red fueron principalmente agregar nuevas estaciones bases, incrementar la potencia de transmisión, reajuste de ángulo de

radiación en el azimut y el estrechamiento del patrón de radiación. Estas modificaciones se hicieron a sabiendas del posible deterioro del sistema debido al fenómeno de las interferencias entre las celdas vecinas y solapamiento de las señales entre los transmisores más cercanos. En la tabla 3 se muestra como el *software* calcula las posibles interferencias adyacentes y cocanales.

Interference Matrices											
Interference Matrices											
	Interfered Cell		Interfering Cell		Co-channel Interference Probability (%)			Adjacent Channel Interference Probability (%)			
	Santa_Catarina_1 (0)		Santa_Catarina_3 (0)		0			0			
			Santa_Catarina_2 (0)		0			0			
	Santa_Catarina_3 (0)		Santa_Catarina_1 (0)		0,01			0			
			Santa_Catarina_2 (0)		0,01			0			
Name	Initial Channel Number	Channel Number	Channel Allocation Status	Initial Physical Cell ID	Physical Cell ID	Initial P-SCH ID	P-SCH ID	Initial S-SCH ID	S-SCH ID	Cost	
Angolare	0	2	Allocated	1	1	1	1	0	0	(	
Angolare	2	0	Allocated	2	2	2	2	0	0	0,573655	
Angolare	2	0	Allocated	1	1	1	1	0	0	0,568447	
CST Sed	2	2	Allocated	328	328	1	1	109	109	0,563234	
CST Sed	0	2	Allocated	423	423	0	0	141	141	0,563385	
CST Sed	0	0	Allocated	424	424	1	1	141	141	(	
Ió Grande	0	2	Allocated	1	1	1	1	0	0	0,606896	
Ió Grande	2	2	Allocated	0	0	0	0	0	0	0,618115	
Ió Grande	2	0	Allocated	2	2	2	2	0	0	(	

Tabla 3-Interferencia entre transmisores

En el mapa de la figura 34, el color rojo representa el área de solapamiento de señales provenientes de dos transmisores, con mayor incidencia en las proximidades de la capital donde se ha desplegado más transmisores.



El *software Atoll* cuenta con herramientas que permite mitigar estas interferencias de forma sencilla con tan solo algunas secuencias de etapas como se detalla a continuación.

3.15 Asignación de transmisores vecinos.

La asignación de los transmisores vecinos (*planning neighbours*), denominación que emplea el Atoll se puede realizar de forma automática o manual. Se decidió realizarla de manera automática, para un número máximo de 8 transmisores vecinos a una distancia máxima entre ellos de 800 m, con una resolución de 10 m y un 10% como área mínima de cobertura. Como resultado el *software* identifica las celdas vecinas para posibles casos de *hondover*, calcula sus áreas de cobertura, bien como el porcentaje y la importancia. En la figura 33 se ve que para el transmisor Santana_1, sus transmisores vecinos vienen siendo Santana_2 y Santana_3 con áreas de cobertura 0.5979 y 0.9251 kilómetros cuadrado respectivamente.

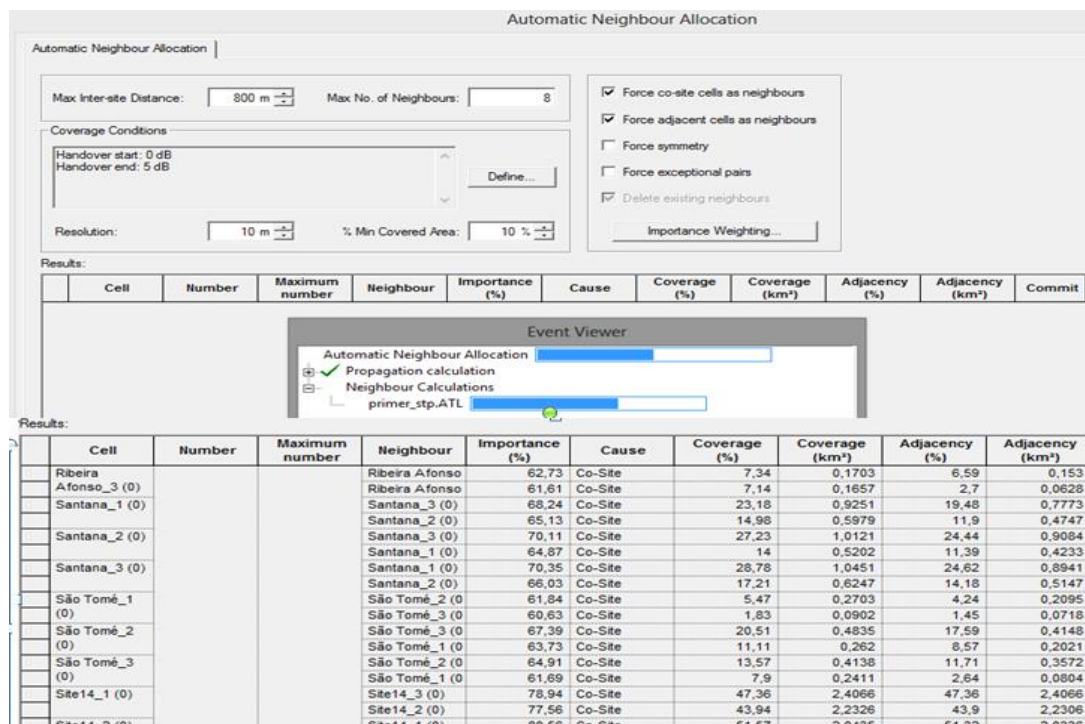


Figura- 33-Proceso de asignación de celdas vecinas

3.16 Planificación automática de frecuencia.

Esta es la segunda etapa propuesta por *Atoll* en el algoritmo para solución del problema de la interferencia. A diferencia de la asignación de vecinos, en esta etapa la planificación de frecuencia sólo se puede ejecutar de forma automática debido a que también fue automática la planificación de vecinos, o sea, es un proceso secuencial. Sus parámetros principales son *Quality Margin* (utilizado para el cálculo del porcentaje de las posibles interferencias ayacentes y co-canales) que se mantuvo con el valor por defecto en 6 dB brindado por el software y la distancia mínima de reutilización de frecuencia cuyo valor se calcula a partir del valor del radio de cobertura asignado en cada sector del transmisor.

3.17 Planificación del *Physical Cell ID*

La planificación del *Physical Cell ID* se realizó de forma automática para cada celda teniendo en cuenta los transmisores colindantes definidos anteriormente. El intervalo es de 504 identificadores permitiendo asignar 3 Ids P-SCH (*Primary Shared Channel*) de 0 a 2 y 168 grupos de canal compartido S-SCH (*Secundar Shared Channel*) dentro del

dominio completo del 0 al 503, con las posibles configuraciones de *locked/allocated/not allocated*.

Site	Transmitter	Name	Initial Physical Cell ID	Physical Cell ID	Initial P-SCH ID	P-SCH ID	Initial S-SCH ID	S-SCH ID	Cost
Angolares 1	Angolares 1_1	Angolar	1	1	1	1	0	0	0
Angolares 1	Angolares 1_2	Angolar	2	2	2	2	0	0	0
Angolares 1	Angolares 1_3	Angolar	1	1	1	1	0	0	0
CST Sede1	CST Sede1_1	CST Se	328	328	1	1	109	109	0
CST Sede1	CST Sede1_2	CST Se	423	423	0	0	141	141	0
CST Sede1	CST Sede1_3	CST Se	424	424	1	1	141	141	0
Mesquita	Mesquita_1	Mesquit	465	465	0	0	155	155	0,00295
Mesquita	Mesquita_2	Mesquit	467	467	2	2	155	155	0,00468
Mesquita	Mesquita_3	Mesquit	73	73	1	1	24	24	0

Tabla 4-Planificación física de celdas

3.18 Análisis de señales y cálculos de predicciones.

Existen dos tipos de cálculos de predicciones de cobertura en *Atoll*, los que permiten analizar los niveles de la señal y los que permiten analizar la calidad de la señal. Los primeros no dependen de las condiciones de carga de la red, mientras que los segundos sí, y por eso no serán objeto de estudio en este trabajo. Las predicciones de calidad de señal se basan en los valores de carga de tráfico en el enlace descendente (*DL Traffic Load*) y en la razón de ruido en el enlace ascendente (*UL Noise Rate*) establecidos en la tabla de celdas (*Cells Table*).

Las predicciones de estudios del nivel de señal recibido de distintas señales LTE en cada píxel del mapa, coberturas por transmisor y estudios de solapamiento que permiten estudiar la configuración inicial de la red sin tomar en cuenta datos de tráfico que comprende estudio de las siguientes señales:

- Cobertura por nivel de señal.
- Cobertura por transmisor.
- Zona de solapamiento de más de una señal.
- Análisis efectivo de la señal.

Se realiza análisis en los puntos más críticos del mapa para verificar que las señales de referencia (RS) y de los enlaces UL y DL se encuentren en un estado de conexión no

fallida. La figura 34 muestra el análisis de la recepción de la señal entre el transmisor 2 de la localidad de Sao Tomé y un punto ubicado a 1255 m de distancia. En este análisis también se estudia el perfil del terreno para los enlaces entre los transmisores y los puntos críticos de recepción, en que se analiza la primera zona de Fresnel y la línea de visibilidad directa, si existen obstáculos que impidan la llegada de la señal o conocer la atenuación por difracción que esta sufre. Se puede observar que la línea de visibilidad directa en este caso se encuentra obstruida por elevaciones del terreno, sufriendo una atenuación por difracción de 13 dB que es señalada con una línea roja.

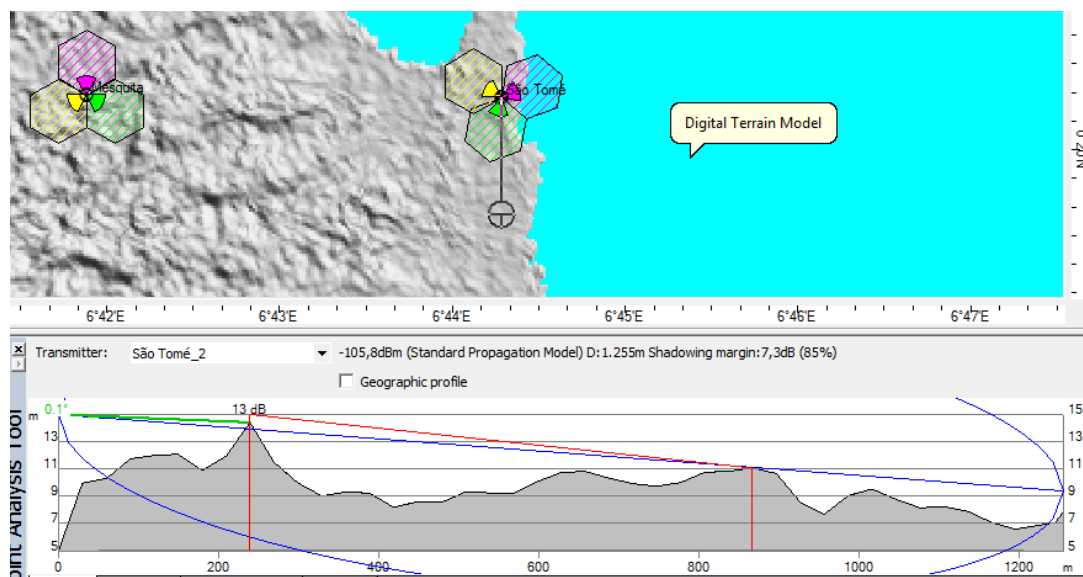


Figura- 34-Análisis del despeje de la zona de Fresnel.

Como solución se propone elevar un poco más la altura de la antena del transmisor de 15 m para 30 m para lograr la línea de visibilidad directa reduciendo a 1 dB la atenuación por difracción.

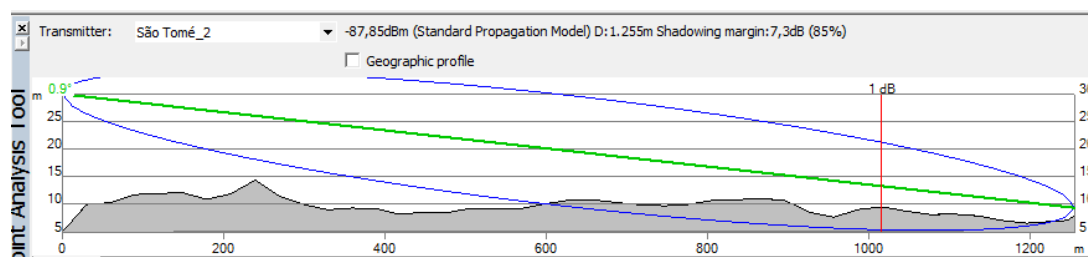


Figura- 35-Reajuste en la altura de las torres

Para la interferencia también se realizan pruebas en los puntos más críticos del mapa para verificar si el nivel de la señal del mejor servidor se encuentre por encima de la señal de interferencia + ruido (I+N) total. En el análisis se verifica que la mejor señal proviene del transmisor Sao Tomé_2 con una intensidad de -88.46 dBm y la más débil llegando a niveles críticos alrededor de -114 dBm.

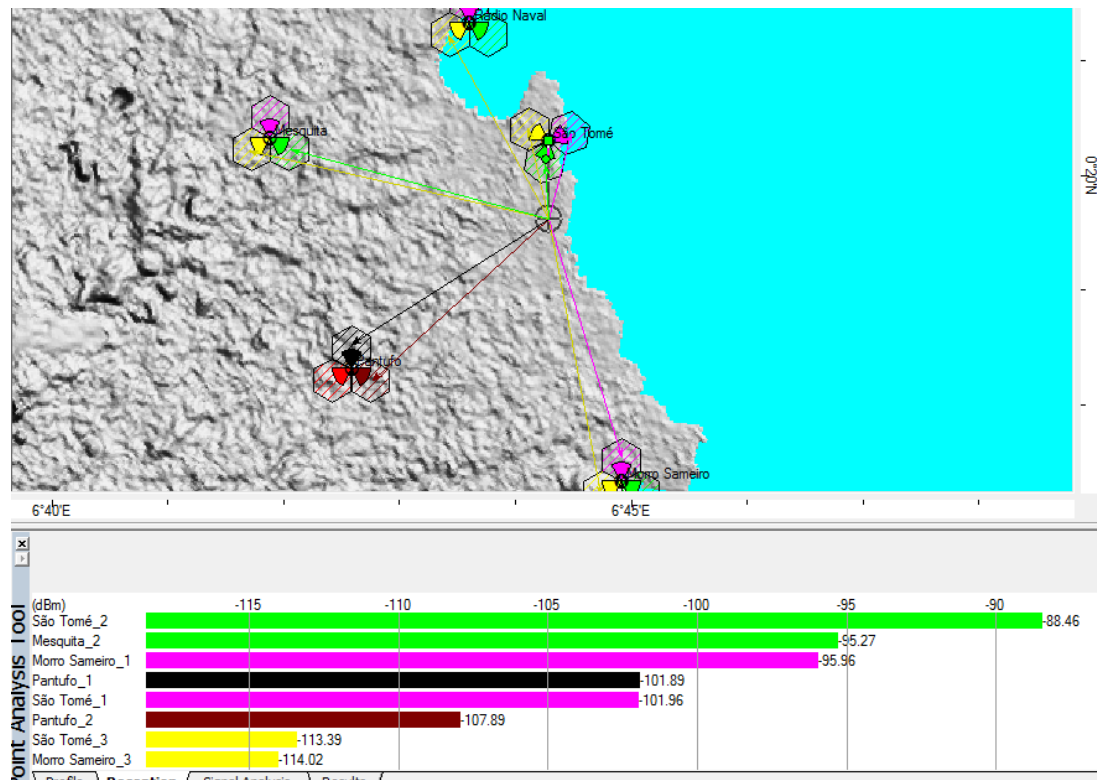


Figura- 36-Intensidad de señales provenientes de varios transmisores

Las simulaciones permiten estudiar la capacidad de la red LTE y el modelo de los diferentes mecanismos de regulación de red, como el control de potencia, control de aumento de ruido, la asignación de ancho de banda de los enlaces de subida y bajada, y el *scheduling*, con el fin de optimizar el rendimiento de la red y maximizar su capacidad. Atoll permite realizar una serie de simulaciones, teniendo en cuenta diferentes aspectos como el estado de conexión, diversidad del terminal, mejor servidor que le corresponde, movilidad, servicio activo, perfil de usuario, entre otros. En LTE, la capacidad y las áreas de cobertura de servicios eficaces de las células se ven influidas por las cargas de tráfico en la red de forma inversamente proporcional. A medida que aumenta la carga tráfico en la red, el área en la que una célula proporciona servicio disminuye. Por esta razón, las cargas en la red deben ser definidas con el fin de calcular las predicciones de cobertura. Para este tipo de análisis se requiere definir la zona de

estudio delimitando el área con un marco de estudio, seguidamente se selecciona el entorno previamente configurado en cuanto a densidad de población. Para esta simulación se definió el entorno rural con una densidad de población de 20 suscriptores por kilómetro cuadrado, equivalente a valores de pérdidas entre 2 y 3 dB, y el entorno suburbano para referir a la localidad central con 200 suscriptores por kilómetro cuadrado con pérdidas entre -5 y -3 dB. Se definen una serie de parámetros, entre los que se destacan el tipo del terminal, perfil y movilidad del usuario y servicio que emplea. Los demás parámetros fueron completados con valores estándares definidos por el *Atoll* y otros datos que fueron distribuidos de forma aleatoria. Para realizar la simulación se ajustaron otros valores como el número de iteraciones a 1, el factor de escala global a 0 y el generador de inicialización a 1 (para generar la misma distribución de usuarios en cada simulación).

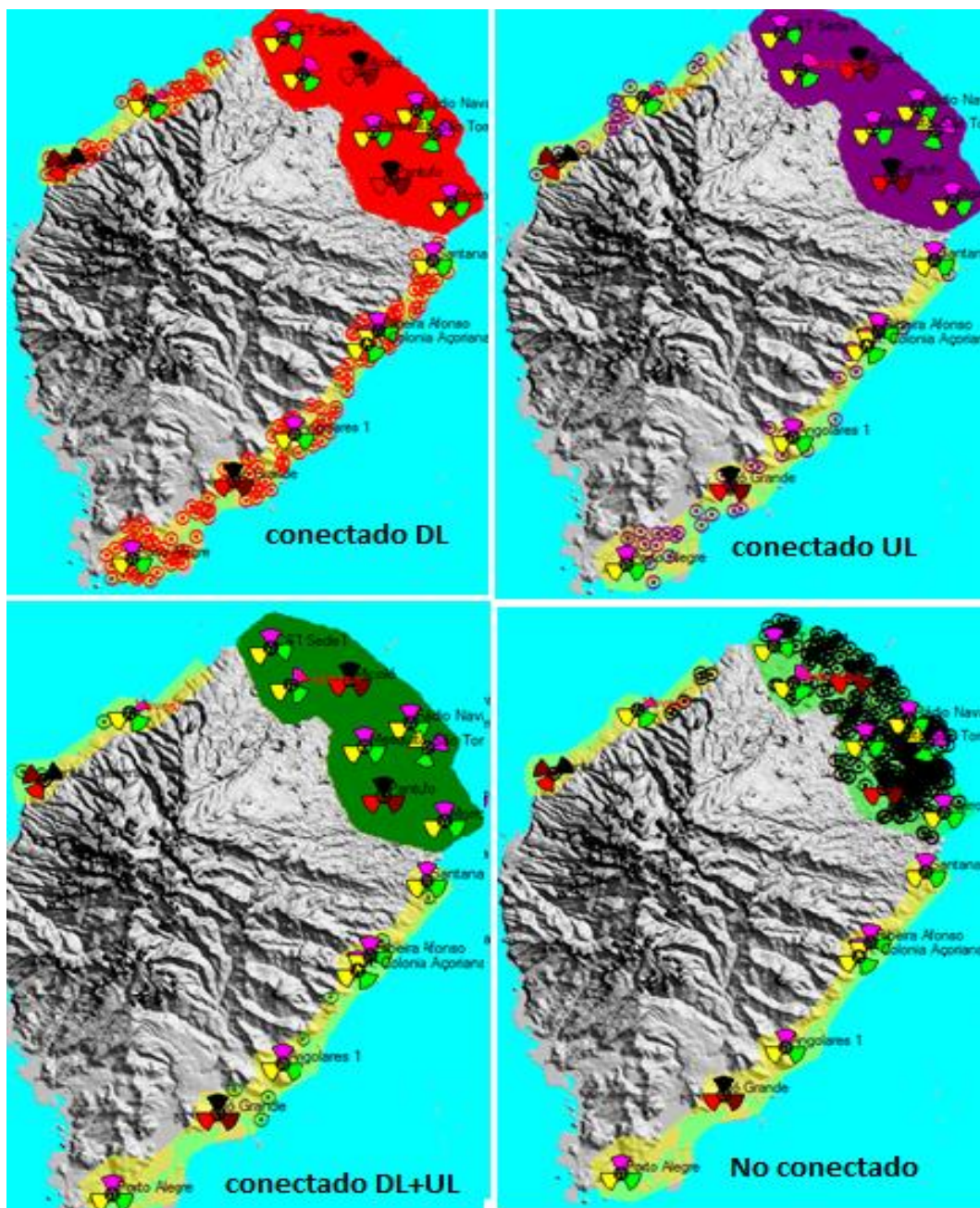


Figura- 37-Cobertura en función de carga de tráfico

Como resultado se aprecia que la eficiencia de la red responde a las necesidades actuales de los usuarios, con un total de 13.009 usuarios con intento de conectarse para los servicios de VoIP y explorador web, logran conectarse 12.681, equivalente a un 97.5%, quedando por fuera 328 usuarios (2.5%). Nótese que estas cifras se alcanzan sin llegar a estado de saturación de recursos que se mantiene en cero.

3.19 Evaluación económica de la propuesta.

El cálculo de la factibilidad de este proyecto es difícil debido a las condiciones económicas actuales del país. Es necesario tener en cuenta el carácter eminentemente social de la implementación, más bien que el beneficio económico que entraña, considerando el uso que en la isla se le confiere al acceso masivo al conocimiento como uno de los puntales pilares para desarrollo que se requiere. No obstante, la evaluación económica de la propuesta tiene en cuenta las fuerzas y medios que deberán instalar las líneas para cada tecnología del estándar para las comunicaciones móviles, incluyendo las licencias y certificaciones de obra, así como el equipamiento propuesto. En el cálculo para las redes móviles se refleja de forma aproximada el gasto a incurrir por la actualización tanto del *hardware* como *software*, luego la relación costo-beneficio viene siendo el principal indicador a tener en cuenta por parte de las operadoras a la hora de decidir si se compensa la migración de UMTS a LTE. En el anexo A, se detalla los costos del equipamiento propuesto para red LTE por parte de algunos proveedores. La licitación y los acuerdos contractuales establecidos con proveedores estratégicos influyen en la decisión final del equipamiento a adquirir. El uso de determinada banda de frecuencia en muchas ocasiones requiere de derecho propietario de licencia. Hay que tener en cuenta, que estos precios no son definitivos, pues durante el proceso de negociación el costo del equipamiento puede variar considerablemente en función del volumen total de la inversión.

3.20 Elección de las soluciones propuestas.

Se presenta el análisis de las soluciones de telecomunicaciones necesarias que dispongan a la red móvil como soporte al despliegue de Banda Ancha, las consideraciones para el despliegue, que señala una etapa previa de preparación y luego el despliegue como tal. La definición del tipo de equipamiento a instalar depende de muchos factores, entre los más importantes cuentan los referidos a los proveedores con que el país tiene convenios internacionales establecidos. SIEMENS, ALCATEL–LUCENT, ERICSSON y HUAWEI, los cuatro poseen buena calidad en equipamiento, son líderes mundiales que dominan el mercado y tienen ventas millonarias en todo el mundo. Las dos primeras ofrecen mayor estabilidad en cuanto al soporte técnico y a las garantías de post-venta, así como convenios de pago a largo plazo. En la solución

propuesta por Huawei para la unidad de radio, incluye un software denominado ROSA (RACE *Open Service Architecture*) que podría ser factible en el caso que sea compatible con el equipamiento instalado en la isla. El costo de los equipamientos juega un importante rol en la toma de decisión de a la hora de elegir uno u otro equipamiento. Los costos OPEX que están relacionados con manutención de la red también es de valorar considerando que estos influyen considerablemente en los gastos cotidianos de la operadora móvil.

Conclusiones

- A título de conclusión se puede afirmar que debido a su posición geográfica, STP se posiciona justo en centro de mundo y en este caso, centro de conexión de los enlaces por fibra óptica que une Europa con África, lo que conlleva a que las islas tengan condiciones suficientemente preparadas para soportar el flujo del tráfico que se generará al implementar las nuevas tecnologías en un futuro no muy lejano, luego de la transición de su red de telefonía a la cuarta generación. Se han podido apreciar las principales características y deficiencias en cuanto a cobertura y provisión de servicio de la red que actualmente está instalada, red de tercera generación.
- En esta investigación, se realizó un estudio de los principales parámetros técnicos asociados a las distintas generaciones de comunicaciones móviles y se profundizó en las características definitorias del nuevo estándar de comunicaciones LTE/SAE. Finalmente, se enunciaron variantes para la evolución de las redes GSM/GPRS/EDGE/UMTS existentes y se propusieron soluciones de acuerdo con el equipamiento disponible y los proveedores actuales, a modo de ejemplo. Sobre estas bases se puede plantear además que, gracias al desarrollo de la tecnología en el campo de las radiocomunicaciones, los sistemas GSM, UMTS y LTE pueden coexistir en la misma banda de frecuencias, en canales adyacentes e incluso, dentro del mismo equipo o emplazamiento celular. Concretamente, la implementación de una red LTE/SAE permite, además, la convivencia e interoperabilidad con tecnologías de acceso radio no compatibles como WiFi y WiMAX.
- El equipamiento propuesto por los principales fabricantes presenta plataformas multi-sistemas con elevada integración en hardware. Se pudo demostrar que el diseño modular de estos equipos permite una evolución progresiva de la tecnología mediante la sustitución paulatina de sus componentes y tarjetas. Esta propiedad es fundamental, ya que permite dar el salto de GSM hacia LTE de forma directa sin pasar por UMTS, aunque se recomienda modernizar las redes gradualmente, en la red actual se cuenta con sistemas UMTS. Además, las estaciones base descritas soportan tanto la fibra óptica como la microonda como solución de *backhaul*, y demás soluciones abordadas. El proceso de

modernización que proponen los proveedores más importantes implica la instalación de una red de transporte Todo IP sobre fibra óptica, de modo que la infraestructura del servicio móvil quedará separada de la red de transporte PDH/SDH.

- Luego de estudiar y analizar las características geográficas y demográficas de la Isla así como las características fundamentales que diferencian la cuarta generación de generaciones predecesoras, y la red actual. Se logra proponer una red de banda ancha implementada sobre la cuarta generación de comunicaciones móviles en las localidades de Santo Tomé donde se percibe una mayor demanda de tráfico, en concordancia con los gastos de inversión que son razonables cuando se evalúa la relación costo-beneficio.
- Se presentan los principales hitos a seguir en la transición hacia redes de cuarta generación propuestos por algunos fabricantes de éstas. Se evalúa por medio de simulación el comportamiento de las redes, empleando el *software Atoll*, se analiza primeramente el comportamiento de la red actual en cuanto a cobertura y se presentan las mejoras a implementar para lograr mayor y mejor cobertura, a través de mejorar los emplazamientos en cuanto a altura de las torres, potencia de transmisión y la adición de algunos emplazamientos. A través de los resultados obtenidos con el *software* quedan evidenciadas las mejoras de la red propuesta.

Recomendaciones

- Tener en cuenta en aquellos sitios donde por su situación geográfica y las condiciones del terreno, no sea factible llevar la fibra óptica, se recomienda emplear la solución de transporte por microondas Mini-Link de Ericsson como alternativa o alguna otra variante de radioenlace pudiendo ser hasta WiMAX, como tecnología complementaria.
- Una vez instalado el equipamiento necesario, la opción más lógica y natural sería comenzar a sustituir los módulos GSM de las estaciones base por otros más avanzados que soporten UMTS o LTE, lo cual requiere en algunos casos una actualización del software en la propia estación base. Los componentes del controlador de estaciones base también pueden ser remplazados según la configuración y las tarjetas instaladas en las estaciones que el mismo controla. Este cambio está siempre asociado a una actualización del software en el BSC.
- Realizar el análisis estadístico, demográfico, que permita evaluar de manera más sólida el comportamiento del tráfico en función de las aplicaciones reales que soportaría la red LTE.

Bibliografía

- [1] V. Hamilton and F. Oliveira, *RELATÓRIO NACIONAL DO ESTADO GERAL DA BIODIVERSIDADE DE S.TOMÉ E PRÍNCIPE*. Santo Tomé, 2007.
- [2] "CIA World Factbook."
- [3] P. Lied, "Telefonia Celular GSM," p. 10, 2005.
- [4] J. Busqués and R. Hector, "DESARROLLO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTACIÓN BASE GSM/CDMA UTILIZANDO SOFTWARE RADIO," 2002.
- [5] F. Zurbano, "PROPUESTA PARA LA EVOLUCION DE LOS SERVICIOS MOVILES EN CUBA," UCLV, Santa Clara, 2011.
- [6] M. Campos, "BSS ZTE. Introducción a la Red de Acceso," 2012.
- [7] M. Garcia, "Propuesta teórica para la implementación de la banda ancha móvil con tecnología LTE/SAE," UCLV, Santa Clara, 2011.
- [8] D. Molta, "Internet Access for Organizations," p. 17, 2012.
- [9] A. Sebastien, "ACE (Africa Coast to Europe) submarine cable extended to South Africa," p. 8, 2009.
- [10] D. Michael, "Carrier Ethernet 2.0," Los Angeles, 2012.
- [11] P. Overview, "A New Generation of Carrier Ethernet," Manchester, 2012.
- [12] N. Overture, "Soluciones de Carrier Ethernet confiables," 2011.
- [13] J. Salvador, "SOLUCIONES PARA MOBILE BACKHAUL," p. 10, 2013.
- [14] F. Córdova, "TECNOLOGIAS DE ACCESO," 2011.
- [15] D. Ambrosia, "THE NEXT GENERATION OF ETHERNET," 2008.
- [16] I. Mena, "Planificación de una red de comunicaciones móviles LTE empleando el programa Atoll," CUJAE, Habana, 2013.
- [17] A. Parkinson, "Standard for Local and metropolitan area networks," *IEEE*, 2006.
- [18] Agusti, R. Bernardo, F. Casadevall, and J. Pérez-Romero, *LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES*. Madrid: Fundación Vodafone España, 2010.
- [19] P. Rizo, "Planificación de una red WiMAX mediante Atoll," 2013.
- [20] A. González, "Descripción de las tecnologías empleadas en las normas IEEE 802.11n y IEEE 802.16e," UCLV, Santa Clara, 2009.
- [21] V. Marojevic and P. Gelonch, "MODELADO PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS DE COMPUTACIÓN EN SISTEMAS SDR," 2008.
- [22] R. Palacios, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODULADOR OFDM RECONFIGURABLE PARA LA TECNOLOGÍA SOFTWARE-DEFINED RADIO SOBRE UN FPGA," PUC, Lima, 2009.
- [23] R. López, "Diseño y evaluación de Algoritmos para la Selección de Redes de Comunicaciones Móviles Según la Calidad del Servicio," UPC, Cataluña, 2011.
- [24] S. Hicks and McGwier, "TRACKING NOTCH FILTER," 2011.
- [25] B. Metcalfe, "The launch of a new Ethernet generation CE 2.0," New York, 2012.
- [26] D. Molta, "Internet Access for Organizations," 2005.
- [27] T. Seclen, "Diseño de un modulador FM basado en la tecnología Software Radio," 2008.
- [28] F. Armstrong, "ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER (ASTER)," 2011.
- [29] E. Winston, "Optimizing Channel Scanning during 802.16e Handover," 2012.
- [30] A. Tanenbaun, *Redes de Computadoras*, 4ª ed., vol. 3. 1997.
- [31] M. Linthicum, "MAXIMIZAR LAS VENTAJAS DE LTE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE SOLUCIONES BACKHAUL TRUE CARRIER ETHERNET," 2012.

-
- [32] E. China, "Implementación de los servicios de Carrier Ethernet sobre un núcleo MPLS," in *Carrier Ethernet sobre MPLS*, Santa Clara, 2011.
 - [33] R. Serran, "Medición de Campo Electromagnético en la Frecuencia de 2.535 GHz de una Antena 4G LTE," IPN, Lima, 2013.
 - [34] Carballo Pacheco, "Estudio del Software Radio Mobile como propuesta docente en las disciplinas de Radiocomunicaciones," UCLV, Santa Clara, 2010.
 - [35] F. China, *Atoll Getting Started Wi-Fi Version 3.1.2*. 2012.

Anexos A

Equipamiento	Fabricante	Costo aproximado
DBS3900	HUAWEI	\$ 49.036,20
RBS 6201	ERICSSON	\$ 21514.07
RBS 6102	ERICSON	\$ 10780.00
RBS 6601	ERICSON	\$ 16525.00
BSC6000 R8	HUAWEI	\$ 25990.00
BTS3900A	HUAWEI	\$ 19872.00
RRU3908	HUAWEI	\$ 60259.00

Anexo B



Banda de Frecuencia	Configuración	Máxima Potencia de salida por sector [§]	Tipo de RBS				
			6101	6102	6201	6202	6601 ⁹
Banda 12 (700 MHz)	1-3 sectores, MIMO 2x2	2x30 W	No	No	No	No	Si
Banda 13 (700 MHz)	1-3 sectores, sin MIMO	60 W	Si	Si	Si	Si	No
	1-3 sectores, MIMO 2x2	2x60 W	Si	Si	Si	Si	No
		2x30 W	No	No	No	No	Si
Banda 7 (2600 MHz)	1-3 sectores, sin MIMO	40 W	Si	Si	Si	No	No
	1-3 sectores, MIMO 2x2	2x40 W					
Banda 4 (1700 /2100MHz)	1-3 sectores, sin MIMO	60 W	Si	Si	Si	No	No
	1-3 sectores, MIMO 2x2	2x60 W	Si	Si	Si	No	No
		2x30 W	No	No	No	No	Si
	4-12 sectores, sin MIMO ¹⁰	60 W	No	Si	Si	No	No
	4-6 sectores, MIMO 2x2 ¹¹	2x60 W					
Banda 2 (2100 MHz)	1-3 sectores, MIMO 2x2	2x30 W	No	No	No	No	Si

Anexo C

Banda LTE	Bandas de UL	Bandas de DL	Duplexado
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 2570 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749 MHz – 1784.9 MHz	1844 MHz – 1879 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427 MHz – 1452.9 MHz	1475 MHz – 1500 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Glosario de Términos y Siglas

ASNGW: Access Service Network Gateway

AAA: Authentication Authorization and Accounting

AES: Advanced Encryption Standard

AMC: Adaptive Modulation and Coding

ARQ: Automatic Repeat reQuest

ASN-GW: Access Service Network GateWay

ATM: Asynchronous Transfer Mode

AP: Access Point

BS: Base Station

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CPE: Customer Premises Equipment

DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

DNS: Domain Name Service

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum

EAP: Extensible Authentication Protocol

ETSI: European Telecommunications Standard Institute

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum

FFT: Fast Fourier Transform

FTTH: Fiber to the Home

FUSC: Fully Used Subcannalization

GPRS: General Packet Radio Service

GSM: Global System for Mobile Communications

HO: (Handover) traspaso de celda

HA: Home Agent

HDTV: High Definition TV

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineering

IMS: IP Multimedia Subsystem

IP: Internet Protocol

IPTV: IP Television

IPv4: Internet Protocol version 4

IPv6: Internet Protocol version 6

IR: (Infrared) Infrarrojo

ISI: Inter Symbol Interference

ISP: Internet Server Protocol

ITU: Internacional Telecommunication Union

LAN: Local Area Network

LMDS: Local Multipoint Distribution System

LOS: Line of Sight

MAC: Media Access Control

MAN: Metropolitan Area Network

Max CINR: Max Carrier- Interference and Noise Ratio

MIP: Mobile IP

MPLS: MultiProtocol Label Switching

MS: Mobile Station

NAT: Network Address Translator

NLOS: Non Line of Sight

OAM: Operation Administration and Maintenance

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*

OLT: *Optical Line Terminal*

ONT: *Optical Networking Terminal*

OSPF: *Open Shortest Path First*

PC: *Personal Computer*

PDA: *Personal Digital Assistant*

PHY: *PHYsical layer*

PMP: *Point to Multipoint*

PPP: *Point to Point Protocol*

PSTN: *Public Switch Telephone Network*

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*

QoS: *Quality of Service*

QPSK: *Quadrature Phase Shift Keying*

RF: *Radio Frequency*

RIP: *Routing Internet Protocol*

SDH: *Synchronous Digital Hierarchy*

SIP: *Session Initiation Protocol*

SNMP: *Single Network Management Protocol*

SNR: *Signal to Noise Ratio*

SOFDMA: *Escalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*

SS: *Subscriber Station*

TDD: *Time Division Duplex*

FDD: *Frequency Division Duplex*

TDM: *Time Division Multiplexing*

TDMA: *Time Division Multiple Access*