

Universidad de la República
Facultad de Ingeniería

Modelado y planificación de redes LTE

LTEst

Proyecto de fin de carrera Ingeniería Eléctrica

Tutores:
Natalia Pignataro-Fernando Fontán

Gustavo Bounous

Leticia Silva

Martín Rodríguez

Montevideo, Uruguay

Octubre, 2012

Agradecimientos

Queremos brindar nuestros sinceros agradecimientos a nuestros tutores, Natalia Pignataro y Fernando Fontán por el asesoramiento durante este año de trabajo.

A distintas personas que han colaborado con nosotros para el desarrollo del proyecto: Martin López y Santiago Mera, por el asesoramiento en lenguaje C++, a Matias Richart, del Instituto de Computación por la ayuda que nos brindó para iniciarnos con el manejo del simulador NS3. A Horacio Ruiz por el conocimiento brindado acerca de la tecnología LTE. A Valeria Meilán, quien gentilmente nos permitió el acceso al material necesario para realizar las pruebas de campo. A Ignacio de León por su asesoramiento en diversos temas relacionados al proyecto. A Verónica Bounous y Rina Tourn por acompañarnos a realizar las medidas en una red real y a Marta Canabarro por haberse ofrecido a leer la documentación completa.

Queremos también agradecer el gran apoyo brindado por nuestros padres y hermanos, Marta, Rolando, Mario, Rina, Sandra, Ruben, Federico, Verónica, Alejandra, Gabriela y Gastón. A Leo y a Sofi quienes nos apoyaron constantemente a lo largo del proyecto y nos dieron las fuerzas necesarias para seguir.

Finalmente agradecemos a Marjorie Chaves y a todos nuestros amigos que aún están a pesar del constante "No puedo" y a nuestros compañeros de trabajo, quienes nos escucharon y aconsejaron.

A todos ellos, ¡GRACIAS!

Resumen Ejecutivo

Este proyecto se enfoca en la obtención de una herramienta de simulación que colabore en la planificación y diseño de una red celular con tecnología LTE. La misma parte de una mezcla de modelos de servicios, cada cual con ciertos requerimientos de calidad de experiencia y brinda elementos para la planificación y diseño de la red en función de la calidad de servicio necesaria.

Como primer paso se realiza un estudio del estado del arte de la tecnología, se desarrolla un modelo de red sobre el cual actúan los modelos de tráfico correspondientes a los servicios de mayor demanda de los usuarios en redes móviles. Una vez modelada la demanda de los usuarios, se identifican las mezclas de requerimientos de servicio que se pueden plantear; para ello es necesario un estudio de los distintos simuladores de redes actualmente desarrollados, estudiando las posibilidades y avances existentes en simulación de redes LTE.

Un resultado esperado es contar con una herramienta que permita evaluar la posibilidad de sustituir servicios de acceso fijo de banda ancha por LTE en zonas de baja densidad de población.

Por último se simulan usuarios en la red implementada y se mide la demanda de tráfico en ciertas condiciones de concurrencia y calidad de enlace extremo a extremo.

Luego de realizadas las simulaciones y aprovechando el desarrollo actual de la tecnología se realizan pruebas en una red real con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones.

Tabla de contenido

1. Introducción	6
1.1. Descripción y objetivos del proyecto	7
1.2. Especificación funcional	8
1.3. Alcance del Proyecto	8
2. Conceptos básicos asociados a la tecnología de LTE	10
2.1. Especificaciones de 3GPP y evolución hacia LTE	10
2.2. Desarrollo de LTE en Uruguay y el mundo	12
2.3. Principales Características de la tecnología	15
2.3.1. Interfaz de Radio	15
2.3.2. Tecnología MIMO	16
2.4. Arquitectura de la Red	17
2.4.1. Componentes de red y características	18
2.4.2. Interfaces de comunicación entre equipos de la red	22
2.4.3. Protocolos	26
2.4.4. Clasificación de Canales	30
2.4.5. Mapeo entre canales físicos y lógicos	33
2.5. Scheduling de Paquetes	33
2.5.1. Importancia del Scheduler	34
3. Calidad de Servicio y Calidad de Experiencia	36
3.1. Servicios demandados por usuarios	36
3.2. Calidad de servicio	37
3.2.1. Modelo de Calidad de Servicio	38
3.2.2. Análisis de QoS	41
3.3. Calidad de Experiencia en el extremo usuario	45
3.3.1. Calidad de experiencia de Voz sobre IP (VoIP)	46
3.3.2. Calidad de experiencia de servicios de datos best effort	48
4. Escenario de Simulación	51
4.1. Elección del simulador	52
4.2. Características de NS3	52
4.3. LENA	53

5. Modelo de Red LTE	60
5.1. Modelo de propagación	61
5.2. Modelo de Antenas	62
5.3. Servicio portador EPS Bearer	63
5.4. Ancho de Banda	63
5.5. Frecuencia de la Portadora y EARFCN	64
5.6. Schedulers	66
5.7. Técnicas MIMO	67
6. Análisis del simulador	68
6.1. Escenario de simulación para realizar el análisis	68
6.1.1. Modelo de propagación de Friis, espacio libre.	71
6.1.2. Modelo de propagación Friis modificado	72
6.1.3. Modelo de propagación Cost231	75
6.1.4. Relevamiento de datos en una red real LTE	76
7. Modelo de distintos tipos de tráfico de servicios demandados por un usuario LTE	85
7.1. Modelo de tráfico VoIP	86
7.2. Implementación de Modelo VoIP	89
7.3. Modelo de tráfico FTP	89
7.4. Implementación del Modelo FTP	90
7.5. Modelo Web Browsing	90
7.6. Implementación de Modelo Web Browsing	92
7.7. Modelo para Video Streaming	93
7.8. Implementación del Modelo de Video Streaming	94
7.9. Análisis de Calidad de Experiencia	95
8. Programa principal	97
8.1. Características del programa	97
8.2. Configuración de la red	98
8.3. Generación de Tráfico	99
8.4. Obtención de información de flujos	101
9. Simulaciones y análisis de resultados	103
9.1. Simulación de VoIP	104
9.2. Simulación de Video Streaming	105
9.3. Simulación de tráfico Web Browsing	107
9.4. Simulación de tráfico FTP	108
9.5. Simulación de distintos servicios concurrentes	109
9.5.1. Comparativa entre acceso fijo de banda ancha y LTE	111
10. Conclusiones	113
10.0.2. Lineamiento de trabajo a futuro	115
10.0.3. Comentarios finales	115
Apéndices	119

A. Instalación de LENA y uso de la herramienta desarrollada	120
A.1. Pasos de la instalación del simulador	120
A.2. Uso de la herramienta desarrollada	121
B. Ejemplos de simulaciones realizadas	122
B.1. Simulación de VoIP	122
B.2. Simulación de Video Streaming	125
B.3. Simulación de tráfico Web Browsing	128
B.4. Simulación de tráfico FTP	130

Lista de ilustraciones

1.1. Especificación funcional para las simulaciones.	8
2.1. Evolución de las tecnologías 3GPP [2].	11
2.2. Estado de LTE en el mundo [9].	12
2.3. Velocidad de desarrollo de sistemas LTE comparado con tecnologías HS-PA [9].	13
2.4. Cantidad de dispositivos LTE lanzados en los últimos meses [9].	14
2.5. Esquema MIMO-Multiple Input Multiple Output 2x2. [5].	16
2.6. División del EPS [5].	17
2.7. Arquitectura de red [3].	18
2.8. Terminal de usuario [5].	18
2.9. Mecanismo de transferencia de información de la interfaz de radio [5].	22
2.10. Modelos de interconexión a través de la interfaz SGi [5].	26
2.11. Protocolos de la interfaz de radio entre eNB y UE [5].	27
2.12. Protocolos utilizados por las interfaces S1 y X2 [5].	28
2.13. Mapeo de canales [4].	33
3.1. Parámetros de QoS [5].	39
3.2. Parámetros de QCI [5].	40
3.3. Objetivos de calidad de funcionamiento para audio y video [13].	42
3.4. Objetivos de calidad de funcionamiento para datos [13].	43
3.5. Requisitos de QoS de usuarios y servicios [13].	44
3.6. Modelo de QoS en el usuario extremo [13].	44
3.7. Proceso de diseño de red [10].	46
3.8. Best effort Internet access [10].	49
4.1. Escenario de simulación.	51
4.2. Stack inferior de protocolos de Radio del eNB [23].	54
4.3. Stack inferior de protocolos de Radio del UE [23].	54
4.4. Stack superior de protocolos de radio [23].	55
4.5. Stack de protocolos del plano de datos LTE-EPC [23].	56
4.6. Flujo de datos en Downlink entre Internet y el UE [23].	58
4.7. Flujo de datos en Uplink entre el UE e Internet [23].	59
5.1. Arquitectura de la Red [16].	60
5.2. Estructura del PRB [5].	64
5.3. Estructura del PRB [5].	64
5.4. Tabla de Datos de subportadoras para los distintos anchos de banda. [5].	64
5.5. Tabla de canales E-UTRA. [18].	65
5.6. Banda de operación E-UTRA. [19].	66

6.1. Esquema de ubicación del Ue.	68
6.2. Modelo de propagación de Friis, Downlink.	71
6.3. Modelo de propagación de Friis, Uplink.	71
6.4. Pérdida de camino, modelo de espacio libre.	72
6.5. Modelo de Friis modificado, Downlink.	73
6.6. Modelo de Friis modificado, Uplink.	73
6.7. Pérdida de camino con $\gamma=2.7$	74
6.8. Pérdida de camino con distintos valores de γ	74
6.9. Modelo de propagación Cost231, Downlink.	75
6.10. Modelo de propagación Cost231, Uplink.	75
6.11. Pérdida de camino, modelo Cost231.	76
6.12. Esquema de transmisión en la herramienta IPERF.	77
6.13. Throughput vs Distancia DL.	78
6.14. Throughput vs Distancia UL.	80
6.15. Throughput Downlink vs Distancia.	81
6.16. Throughput Uplink vs Distancia.	81
6.17. Diagrama de radiación horizontal, antena eNB [24].	83
6.18. Ajuste de modelo de propagación. Pérdida de camino según la distancia.	83
7.1. Modelo ON-OFF para VoIP [11].	87
7.2. Modelo FTP [6].	90
7.3. Web Browsing, packet call [6].	91
7.4. Parámetros Modelo Web Browsing [21].	92
7.5. Modelo Video Streaming.	93
7.6. Parámetros Modelo Video Streaming [21].	94
9.1. Simulaciones de VoIP.	105
9.2. Simulaciones de Video Streaming.	107
9.3. Simulaciones de Web Browsing.	108
9.4. Simulaciones de FTP.	109
9.5. Esquema de modulaciones en LTE [28].	112

Introducción

La siguiente documentación corresponde al proyecto final en la carrera Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

La evolución de las comunicaciones celulares ha crecido de forma rápida y eficiente en las últimas dos décadas. En los comienzos de la década de 1990 se buscó satisfacer las necesidades de las comunicaciones de voz, donde la tecnología predominante utilizada a nivel mundial fue GSM. Las tecnologías de las redes celulares fueron evolucionando para satisfacer cada vez más las necesidades de los usuarios, cambiando las arquitecturas de las redes y ofreciendo mayores servicios, existiendo compatibilidad con las tecnologías anteriores. El gran nivel de servicios de voz alcanzado con GSM abrió el camino hacia los servicios de datos con GPRS y luego para el desarrollo de UMTS dedicado a la oferta de tráfico de datos de alta velocidad en redes celulares.

Los servicios de datos se transformaron en una necesidad esencial para los usuarios y para mantener la competitividad de la tecnología 3G, la 3GPP desarrolló lo que se define como Long Term Evolution - LTE, release 8. Con esta tecnología se busca satisfacer las necesidades de las redes celulares que existirán en el año 2017 y posteriores. Los principales objetivos son incrementar las velocidades de transmisión, ampliar la cobertura, reducir las latencias y transformar la red en una red de paquetes.

Al definir los objetivos de LTE release 8 se plantea superar el desempeño de las redes 3GPP existentes al momento, basadas en HSPA (Release 6). En la interfaz de aire, como técnicas de acceso múltiple al medio se utiliza OFDMA y SC-FDMA, para los canales de Downlink y Uplink respectivamente.

Para lograr tasas de transferencia elevadas se utiliza diversidad espacial mediante la tecnología MIMO y la arquitectura de la red es modificada de forma de reducir los tiempos de latencia y facilitar la escalabilidad del sistema. A diferencia de los sistemas anteriores, LTE se diseña completamente orientado a paquetes (PS).

1.1. Descripción y objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es la obtención de una herramienta de software que actúe en el diseño y planificación de una red de telefonía móvil con tecnología LTE release 8. Es una herramienta de simulación de diferentes escenarios que una red celular puede presentar. Los usuarios del sistema demandan distintos servicios los cuales tienen diferentes requerimientos de calidad de experiencia, por lo tanto la red debe brindar una buena calidad de servicio para poder satisfacer las condiciones esperadas.

El escenario principal con el que se trabaja, es el de una única radio base, eNB, en una zona suburbana teniendo cierta área de cobertura. Se optó por trabajar con una sola radio base para poder eliminar la posibilidad de handover y se eligió como escenario una zona suburbana para poder trabajar con modelos de propagación que no involucren la pérdida de caminos por obstáculos, como pueden ser edificaciones o cerros. Es importante destacar que los usuarios son distribuidos uniformemente alrededor de la radio base sin presentar movilidad y el comportamiento del tráfico es estacionario, es decir, los valores medios de tráfico no varían con el tiempo.

La red es utilizada por los usuarios para cursar distintos tipos de tráfico: servicios de voz (VoIP), navegación web, descarga de archivos (FTP) y sesiones de video streaming. Para representar el uso de estos servicios se utilizan distintos porcentajes de demanda desde las diferentes ubicaciones de los usuarios que son sorteadas de forma aleatoria. Se estudian escenarios de simulación donde el tráfico que se representa es semejante al que existe en la hora de mayor carga de la red, "Busy Hour". Ante la demanda de estos servicios la red se verá obligada a atenderlos con una calidad de servicio que cumpla las condiciones para que los usuarios obtengan la calidad de experiencia deseada bajo las distintas condiciones de radio en la que se encuentran.

Bajo estas consideraciones fue necesario el estudio de simuladores de red que actualmente están siendo desarrollados, concentrando el estudio en simuladores de redes LTE para poder representar el escenario planteado.

Al desarrollar las hipótesis del proyecto en un simulador de red se podrá analizar el funcionamiento de la tecnología ante los diferentes escenarios de demanda y diferentes condiciones de radio. De esta manera es posible determinar si la red, al ser afectada por una mezcla de servicios concurrentes, puede brindar una calidad de servicio que satisfaga la calidad de experiencia deseada.

Para poder verificar que las simulaciones de estos escenarios reflejan la realidad, se realizan pruebas en una red real con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones.

1.2. Especificación funcional

El desempeño del sistema es evaluado ante la demanda de una mezcla dada de servicios, con cierta calidad de experiencia deseada. Para ello se modelan los distintos tipos de tráficos que participan en la simulación, los cuales generan ciertos requerimientos de red para poder ser atendidos. Es decir, las diferentes mezclas de servicios marcan la demanda al sistema y ajustando parámetros de la red podremos obtener su desempeño. La figura 1.1 muestra un esquema de funcionamiento de un escenario de simulación.

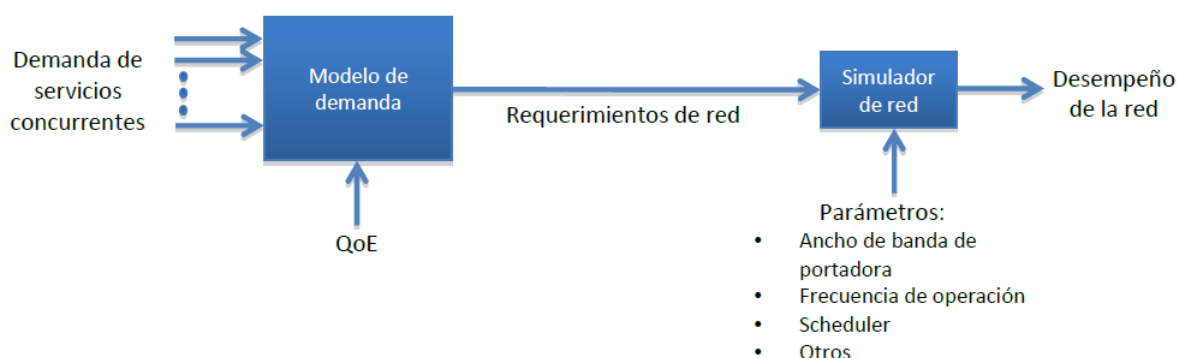


Figura 1.1: Especificación funcional para las simulaciones.

A partir del desempeño obtenido se podrá verificar si las condiciones de calidad de experiencia fueron las deseadas ante la calidad de servicio ofrecido.

1.3. Alcance del Proyecto

Concentramos nuestro análisis en el estudio de una única celda, sin considerar el estado dinámico de la misma. La celda posee un cierto radio de cobertura en el que los usuarios están distribuidos uniformemente, con distintas condiciones de radio y demandando distintos tipos de servicios.

Un aspecto importante, es que la relación entre la demanda de servicios y la capacidad de la red se analiza en la “Busy Hour”. Esta consideración permite crear un escenario donde es posible el análisis de dimensionamiento de la red de acceso debido a que es la hora donde existe mayor carga en la red. Bajo estas hipótesis se considera que el comportamiento del tráfico es estacionario, esto significa que los valores medios de tráfico no varían con el tiempo.

Con respecto a la cantidad de usuarios, la misma permanece fija durante la simulación ya que se considera un estado estacionario, es decir, la cantidad de usuarios no varía ya que los que entran a la celda son en número, igual a los que salen y sus comportamientos son equivalentes desde el punto de vista estadístico. A su vez, como se trabaja con una única celda no existe posibilidad de handover con celdas vecinas.

Se pretende obtener medidas de desempeño del sistema a través de los resultados obtenidos de las distintas simulaciones, sin intentar abordar una completa planificación

de red. En base a estos resultados se estudia la posibilidad de brindar servicios de acceso fijo de banda ancha utilizando la tecnología LTE.

Conceptos básicos asociados a la tecnología de LTE

En este capítulo se realiza un resumen de los aspectos claves de la tecnología LTE necesarios para un estudio del modelado y planificación de la red junto con el desarrollo actual de LTE en Uruguay y en el Mundo.

Abordando las especificaciones de la tecnología dada por la 3GPP se presenta la arquitectura de la red y las principales características de la interfaz de radio y tecnologías asociadas.

2.1. Especificaciones de 3GPP y evolución hacia LTE

Los siguientes requerimientos fueron planteados por la 3GPP en la etapa de estudio de LTE release 8.

- *Tasa de Transmisión:* 100 Mbps de valor pico en Downlink, 50 Mbps de valor pico en Uplink, utilizando un ancho de banda de 20 MHz con dos antenas receptoras y una antena transmisora en el terminal utilizando tecnología MIMO.
- *Flexibilidad en uso de Bandas de Frecuencia:* LTE es una tecnología adaptativa la cual puede implementarse con diferentes anchos de banda: 1.25; 2.5; 5; 10; 15 y 20 MHz.
- *Eficiencia Espectral:* entre 2 y 4 veces superior a HSPA (Release 6).
- *Latencia:* round trip time menor a 10ms.
- *Movilidad:* debe soportar altas velocidades de movilidad de los usuarios, como ser casos especiales de transporte, por ejemplo en trenes de hasta 350 km/h.
- *Eficiencia en el uso de potencia en los terminales.*
- *Compatibilidad:* Debe haber coexistencia con operadores de bandas adyacentes, de esta forma los usuarios pueden pasar de LTE a sistemas GSM/GPRS o WCDMA.

- *Costos*: se reducen los costos de inversión denominados CAPEX(Capital Expenditures) así como también los costos de operación OPEX (Operational Expenditures). Los costos de una efectiva migración de interfaz de radio del Release 6 UTRA y de la arquitectura deben ser alcanzables, soportando todas las interfaces especificadas para la interoperabilidad con equipos multi-vendor.

En la figura 2.1 se muestra la evolución de las tecnologías con sus diferentes características. Es importante notar como la evolución permitió incrementar las velocidades de transmisión y reducir las latencias de la red.

	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA / HSUPA	HSPA+	LTE
Max downlink speed bps	384 k	14 M	28 M	100M
Max uplink speed bps	128 k	5.7 M	11 M	50 M
Latency round trip time approx	150 ms	100 ms	50ms (max)	~10 ms
3GPP releases	Rel 99/4	Rel 5 / 6	Rel 7	Rel 8
Approx years of initial roll out	2003 / 4	2005 / 6 HSDPA 2007 / 8	2008 / 9	2009 / 10
Access methodology	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA / SC-FDMA

Figura 2.1: Evolución de las tecnologías 3GPP [2].

2.2. Desarrollo de LTE en Uruguay y el mundo

En Octubre de 2012, la GSA -Global mobile Suppliers Association- ha publicado un informe el cual establece que actualmente son 351 los operadores de telecomunicaciones que están invirtiendo en LTE en 104 países. En la figura 2.2 se puede observar que a la fecha hay 299 redes LTE comerciales en 93 países, entre los cuales se encuentra Uruguay.

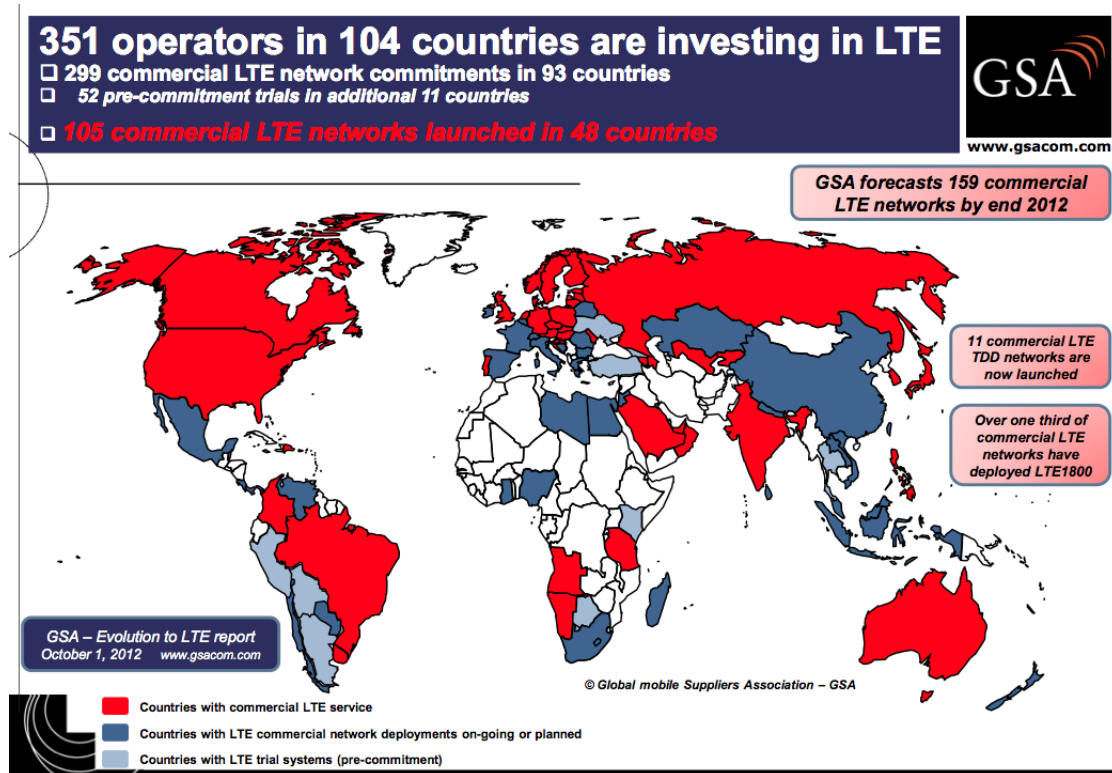


Figura 2.2: Estado de LTE en el mundo [9].

En nuestro país, luego de que Antel realizará pruebas piloto durante el año 2011 en centrales de Montevideo y Punta del Este, ha lanzado al mercado el producto “Internet VERA Móvil”, el cual consta de un plan asociado a un módem LTE que brinda una velocidad de transmisión de datos de hasta 20 Mbps de bajada y de 2 Mbps de subida.

Por otro lado, la empresa de telecomunicaciones Dedicado, la cual ofrece sobre su propia red, servicios de transmisión de datos, banda ancha de Internet y telefonía, ha invertido más de 5 millones de dólares en el despliegue de una red de acceso Wimax / LTE. [7]

Otro reporte de la GSA muestra que los operadores comprometidos con LTE están desarrollando esta tecnología mucho más rápido que como lo hicieron con HSPA, que hasta ahora había sido la tecnología de comunicaciones móviles con desarrollo más rápido. La figura 2.3 muestra como los operadores luego de 6 y 12 meses del primer lanzamiento de un sistema comercial LTE, han desarrollado esta tecnología de manera más rápida que HSDPA, HSUPA y HSPA+ en su momento.

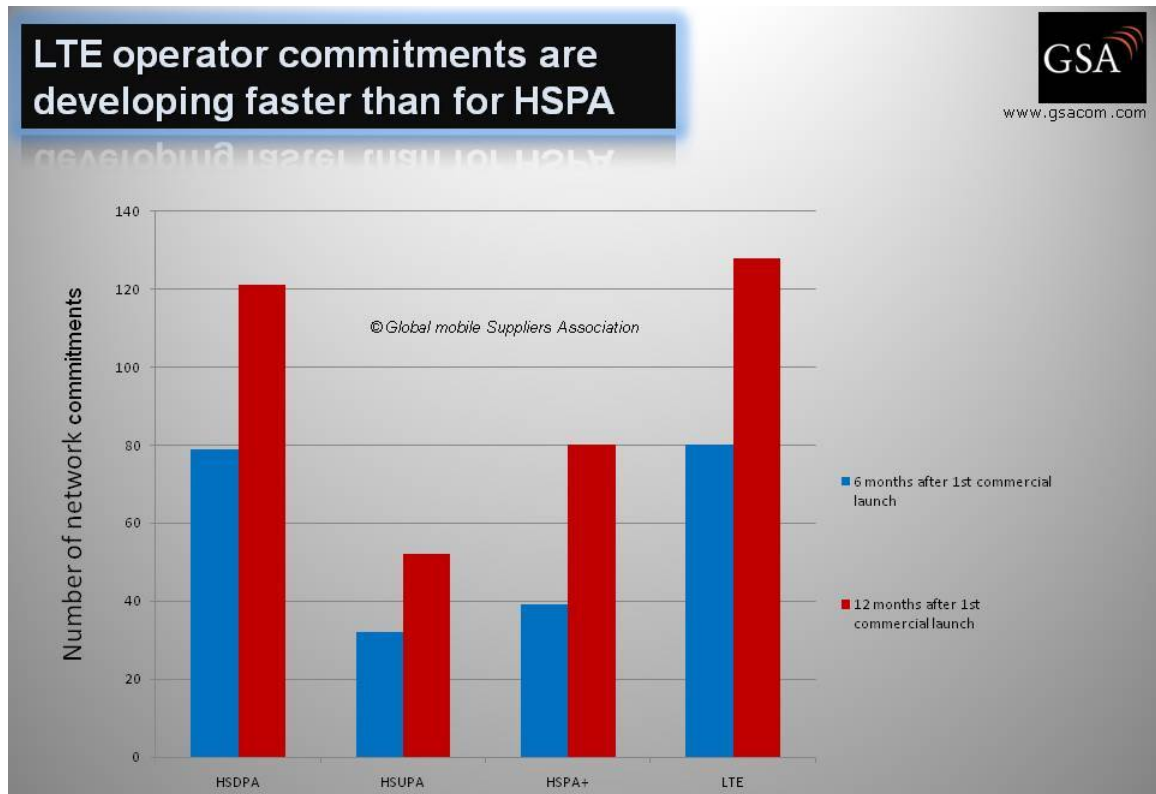


Figura 2.3: Velocidad de desarrollo de sistemas LTE comparado con tecnologías HSPA [9].

Un aspecto importante a tener en cuenta en la evolución de la tecnología Long Term Evolution es la cantidad de dispositivos capaces de conectarse a una red LTE presente en el mercado. La figura 2.4 muestra que la cantidad de equipos que soportan LTE ha incrementado en un 36 % en los 3 meses previos a Enero 2012.

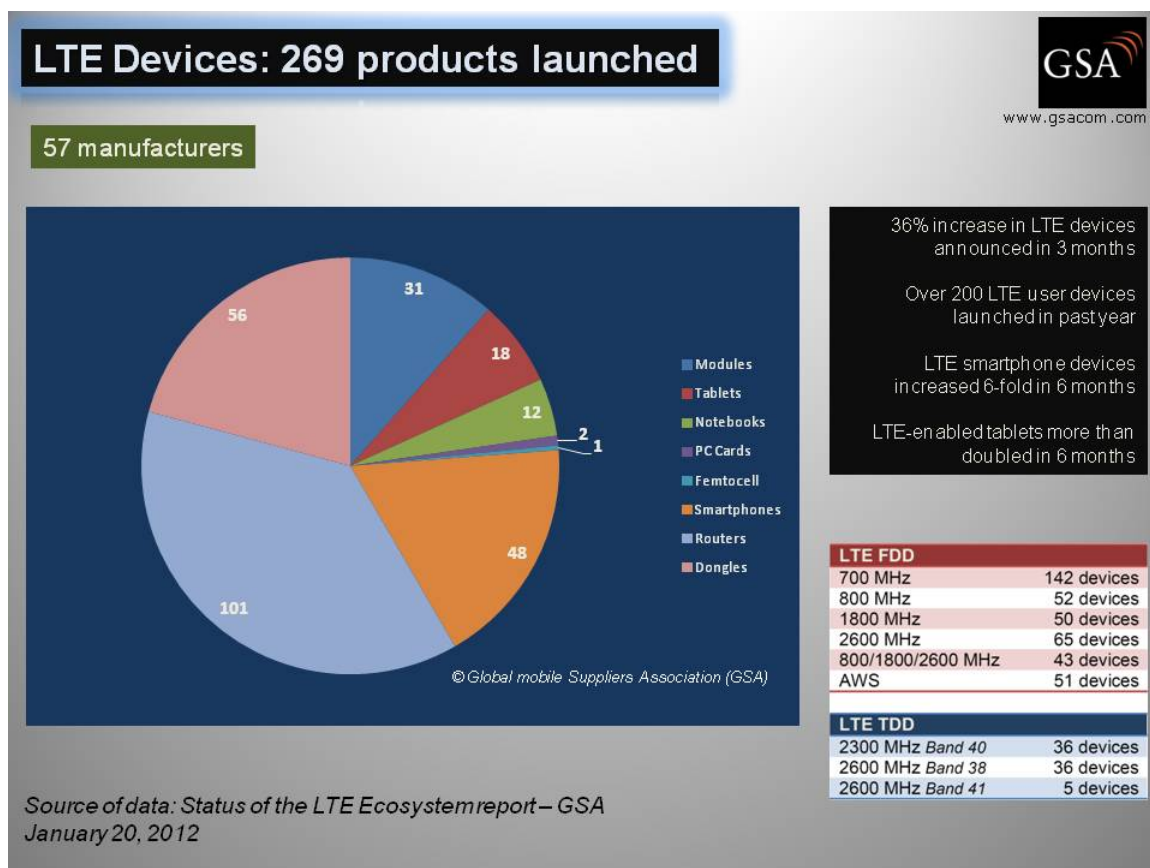


Figura 2.4: Cantidad de dispositivos LTE lanzados en los últimos meses [9].

2.3. Principales Características de la tecnología

2.3.1. Interfaz de Radio

LTE deja de lado la interfaz de radio CDMA (Code Division Multiple Access) para utilizar OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) para el canal de Down-link(DL) y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para el canal de Uplink(UL). La elección de SC-FDMA para el UL está basada en permitir un diseño de amplificadores de potencia eficientes en el equipo de usuario, de forma de aumentar la duración de las baterías en el mismo.

Esta técnica de comunicación se basa en la división de un flujo de datos en N flujos paralelos, cada uno con una tasa de transmisión $\frac{1}{N}$ del flujo original. Como estos flujos de datos paralelos son más lentos, la duración de cada símbolo modulado es mayor y eligiendo el número adecuado de subportadoras y las distancias de separación entre ellas se puede lograr la eliminación de la interferencia intersimbólica.

La distribución de los recursos en el dominio de frecuencia se da con una resolución de 180kHz(12 subportadoras x 15kHz), tanto para UL como para DL. La ortogonalidad entre las portadoras permite un uso eficiente del espectro, ya que no hay bandas de separación entre las mismas.

Para SC-FDMA en el UL, se utiliza una portadora fija por usuario, mientras que con OFDMA en DL se asignan libremente recursos de diferentes porciones del espectro disponible. La flexibilidad en el uso del espectro en LTE permite seleccionar entre 1,4MHz y 20MHz de ancho de banda, dependiendo de los recursos disponibles. Varios usuarios de una misma portadora pueden estar activos al mismo tiempo, compartiendo todos ellos los recursos de la interfaz de aire. Estos recursos están compuestos por cierto número de Physical Resource Blocks (PRBs), cada uno de ellos con 12 subportadoras y 14 símbolos.

El PRB es la unidad mínima de recursos de radio de LTE y tiene la misma estructura para DL y UL, sin embargo, el uso de los Resource Elements (REs), que están compuestos por una única subportadora dentro el símbolo, es diferente en cada dirección (UL y DL). Tenemos entonces 168 RE en cada PRB (14 símbolos OFDM x 12 sub portadoras), pero no todos ellos son utilizados para tráfico de datos de usuario, algunos son utilizados para señalización y para el envío de señales de referencia dependientes de la configuración MIMO utilizada.

El número de PRBs disponibles varía según el ancho de banda utilizado(que como se menciona anteriormente puede ir de 1,4 a 20MHz), siendo esto determinante para el throughput disponible en la celda.

2.3.2. Tecnología MIMO

La tecnología MIMO-Multiple Input Multiple Output, es utilizada por LTE para poder alcanzar altas velocidades de transmisión y mejorar el desempeño de la red. Con esta tecnología se logra obtener mejoras en la eficiencia espectral además de las ya obtenidas por el uso de la técnica OFDM.

La tecnología MIMO se basa en la utilización de los multicaminos que existen en la propagación de una señal entre un transmisor y un receptor como una ventaja. De esta manera se puede incrementar el Throughput de un canal con un ancho de banda especificado. Al utilizar varias antenas en el transmisor y el receptor, junto con un procesamiento digital de la señal, se logra obtener varios flujos de datos sobre el mismo canal permitiendo aumentar la capacidad del mismo.

Diferentes esquemas de MIMO se utilizan tanto para el Downlink como para el Uplink, debido a la limitación dada por la potencia de transmisión de los móviles y para disminuir la complejidad y costo de los mismos. Una configuración común para el sentido Downlink en LTE es el de dos antenas transmisoras en la radiobase y dos antenas receptoras en el móvil, conocido como MIMO 2x2. Existen también otras configuraciones utilizadas como ser MIMO 4x4 donde se usan cuatro antenas transmisoras y cuatro antenas receptoras. La configuración en el sentido Uplink, como se explicó anteriormente, busca reducir los costos de los móviles por lo que se utiliza sólo una antena transmisora en el móvil y varias antenas receptoras en la radiobase. Esta técnica es conocida como MU-MIMO (Multi User MIMO), la radiobase posee varias antenas para recibir información de varios usuarios.

La figura 2.5 muestra un esquema de antenas para un sistema MIMO.



Figura 2.5: Esquema MIMO-Multiple Input Multiple Output 2x2. [5].

2.4. Arquitectura de la Red

Para cumplir con los requerimientos de gran capacidad en la red es necesario, aparte de las mejoras en la interfaz de radio, una evolución en la arquitectura de la red que aumente la escalabilidad de la misma de cara a una creciente evolución del tráfico y reduzca el número de elementos para disminuir la latencia.

En LTE se introduce un nuevo tipo de radiobase, el eNodeB (evolved NodeB), que se encarga de manejar los protocolos de radio, de gestión de movilidad, compresión de encabezados y retransmisión. De esta forma se implementan en los nodos de la red de acceso las funciones que anteriormente cumplían los RNC en la arquitectura de UMTS, siendo este componente eliminado.

Teniendo como meta el soporte de conmutación de paquetes con perfecta movilidad y buscando ofrecer todos los servicios de comunicaciones mediante conmutación de paquetes, se modifica completamente el núcleo de Red. Se logra un diseño eficiente del Core mediante la separación de los planos de usuario y de control. El Mobility Management Entity (MME) maneja el plano de control, mientras que el Serving Gateway (S-GW) maneja el plano de usuario.

El sistema completo de la arquitectura de LTE es denominado Evolved Packet System (EPS). El EPS puede dividirse por un lado en la nueva red de acceso, llamada Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) y por otro en el dominio de paquetes Evolved Packet Core (EPC).

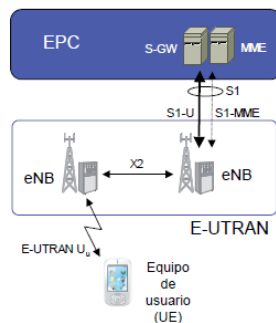


Figura 2.6: División del EPS [5].

Esta separación entre los planos de control y de usuario en el EPS permite un dimensionamiento independiente de los mismos. Esto representa una ventaja dado que la capacidad del plano de usuario depende de la suma de los throughputs requeridos por los usuarios mientras que la del plano de control depende del número de usuarios y sus patrones de movilidad.

2.4.1. Componentes de red y características

Los diferentes componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicaciones a través de la conmutación de paquetes, por lo cual la diferencia principal con la arquitectura de los sistemas 3G y 2G es que LTE no contiene en su arquitectura un sistema de conmutación en modo circuito.

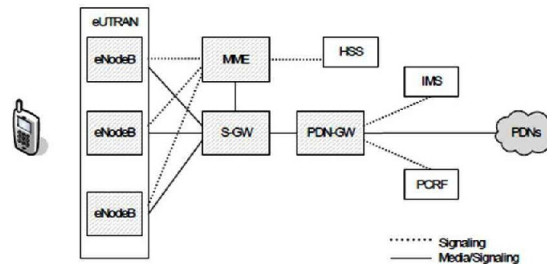


Figura 2.7: Arquitectura de red [3].

- **Terminal de usuario:**

El terminal de usuario, o User Equipment (UE), es el dispositivo que permite a los usuarios conectarse a la red LTE. Contiene un módulo de suscripción del usuario a la red, llamado Universal Subscriber Identity Module (USIM), el cual está separado del resto del terminal llamado habitualmente como Mobile Equipment (ME). USIM es una aplicación ubicada en una tarjeta inteligente removible llamada Universal Integrated Circuit Card (UICC).

El UE mantiene la señalización con la red, necesaria para el establecimiento y liberación de los enlaces de comunicación así como las funciones de gestión de movilidad. De esta manera ofrece una plataforma para las aplicaciones de comunicación del usuario.

Se definen 5 clases de UE, con diferentes especificaciones de capacidad que van desde 5 a 75 Mbps en UL y de 10 a 300Mbps en DL, soportando todas ellas hasta 20MHz para transmisión y recepción.

Es importante tener en cuenta el tipo y comportamiento de los UE a la hora del dimensionamiento de la red.

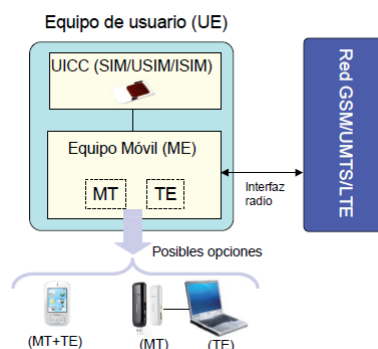


Figura 2.8: Terminal de usuario [5].

- **Evolved NodeB (eNB):**

El Evolved NodeB es el único componente de la red de acceso E-UTRAN. Es una radiobase encargada del control de todas las funciones de la interfaz de radio. Se encarga de conectar los UEs con el EPC, siendo responsable de las funciones de Radio Resource Management (RRM), gestionando la asignación de recursos y el scheduling basado en requerimientos de QoS y monitoreo constante de la utilización de recursos. Las funciones de scheduling consisten en la asignación dinámica de los recursos de radio, tanto en el enlace ascendente como descendente para realizar el tráfico de datos con la correcta calidad de servicio. Es responsable de la gestión de movilidad, realizando mediciones y analizando también las medidas reportadas por los UE para tomar las decisiones de handover correspondientes.

Cuando un terminal se registra en la red, el eNB selecciona de forma dinámica la entidad MME que controlará su acceso a la red. De esta forma es posible equilibrar la carga de señalización entre diferentes MME así como aumentar la robustez del sistema.

Debido a que el eNB es capaz de enviar y recibir paquetes IP de los usuarios a los cuales está conectado a través de los Serving Gateway (S-GW), también cumplirá funciones de ruteo del tráfico de usuario hacia los S-GW.

- **Mobility Management Entity (MME)**

Es el principal elemento de control del EPC, sólo trabaja con el plano de control (CP-Control Plane) y gestiona el acceso de los usuarios a través de la E-UTRAN. Cada terminal usuario tiene asignado un MME, el proceso de selección del MME es realizado tal como se mencionó anteriormente por el eNB durante el proceso de registro del equipo en la red LTE.

Las principales funciones del MME son:

- Control de acceso de los usuarios a la red mediante los procesos de identificación y autenticación.
- Manejo de la señalización necesaria para mantener, modificar y liberar los servicios portadores EPS sobre los cuales se envían los paquetes IP entre el terminal de usuario y la red externa.
- Gestión de movilidad de los usuarios que están en modo idle, cuando los terminales no tienen ninguna conexión de control establecida con la E-UTRAN. El MME realiza el seguimiento de la localización de los usuarios dentro de un área específica de seguimiento denominada "Tracking Area" mediante un procedimiento de actualización de área llamado "Tracking Area Update".
- Manejo de la señalización requerida para realizar la movilidad de los equipos de usuario entre la red LTE y otras redes 3GPP como UMTS o GSM.

- **Serving Gateway (S-GW):**

El Serving Gateway es el elemento pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Cumple funciones de switching en el plano de usuario (UP-User Plane) encargándose de encaminar los datos entre el eNB y el P-GW. Cuando un usuario es registrado en la red LTE, se le asigna un MME y también un S-GW a

través del cual circula el plano de usuario. La elección del S-GW correspondiente a cada terminal de usuario es realizada por el MME.

En caso de que un UE se encuentre en modo idle, la conexión termina en el S-GW, liberándose así los recursos del eNB. En caso de que lleguen del P-GW datos para ese usuario, estos se almacenan en un buffer y se solicita al MME que envíe un mensaje de paging hacia el UE.

Las principales funciones del S-GW son:

- El S-GW actúa como punto de anclaje en la red EPC con respecto a la movilidad del terminal de usuario entre eNBs. Durante un proceso de handover entre dos eNB se mantiene el mismo camino de comunicación entre el Serving Gateway y el Packet Data Network Gateway. Esta función de punto de anclaje también se efectúa cuando la movilidad se realiza con las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN).
 - Almacenamiento de los paquetes IP de los usuarios que se encuentran en modo idle. Cuando se recibe tráfico de la red externa dirigido a un usuario en modo idle, este tráfico llega hasta el S-GW correspondiente y este retiene temporalmente los paquetes IP e inicia junto al MME el restablecimiento del plano de usuario hasta el terminal.
 - Encaminamiento del tráfico de usuario hacia y desde los distintos PDN-GW a los que este podría estar conectado. A pesar de que un usuario puede estar conectado con diferentes PDN-GW, el tráfico atravesará un único S-GW.
- **Packet Data Network Gateway (PDN-GW o P-GW):**

Es el router de borde entre el EPS y las redes de paquetes externas, llamadas Packet Data Networks, siendo de esta forma el punto de anclaje de más alto nivel en el sistema.

Las principales funciones del P-GW son:

- Aplicación de reglas de utilización de la red y de control de tarificación a los servicios portadores que tenga establecidos el terminal.
 - Asignación de la dirección IP del terminal de usuario que se utilizará en la red externa. Esta asignación de dirección IP se realiza a través de los protocolos NAS o mediante protocolos de redes IP como DHCP, pudiendo ser esta IPv4 o IPv6.
 - Filtrado y procesamiento del tráfico IP, asociando los paquetes con su respectivo usuario y servicio portador EPS. De esta forma se pueden aplicar reglas de uso y verificación de validez de los paquetes, descartando aquellos considerados anómalos o no autorizados.
- **Home Subscriber Server (HSS):**
- El HSS es la base de datos que almacena la información relativa a la suscripción de los usuarios y a la operativa de la red. Esta base de datos es consultada y modificada desde los componentes encargados de proporcionar los servicios de conectividad de las redes 3GPP, ya sea el MME para LTE o el SGSN para redes UTRAN o GERAN. Dentro de la información que almacena el HSS se puede destacar:

- Identificadores de usuario como el International Mobile Subscriber Identity (IMSI).
- Identificadores de servicio como el Mobile Station ISDN (MSISDN).
- Información de seguridad y cifrado.
- Información de localización del usuario en la red.
- Información necesaria para la provisión de los servicios de acuerdo con las condiciones establecidas en el contrato de suscripción.

El HSS fue estandarizado en el Release 5 de la 3GPP en base a la integración de dos componentes definidos en redes GSM: Home Locator Register (HLR) y Authentication Center (AUC), a los cuales posteriormente se le añadieron funciones necesarias para soportar el acceso y operativa del sistema LTE.

- **Policy and Charging Rules Function (PCRF):**

Es el elemento de la red encargado de controlar los servicios de la red LTE en términos de calidad de servicio (QoS) y es quien realiza el control de la tarificación. Provee información al PDN-GW y si aplica, también al S-GW para poder configurar las portadoras apropiadas.

2.4.2. Interfaces de comunicación entre equipos de la red

El eNB se comunica con el resto de los elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2.

Interfaz Uu: Permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB.

Existen tres tipos de mecanismo de transferencia de información en el canal de radio:

Difusión de señalización de control, la cual permite a los usuarios detectar la presencia del eNB y conocer sus parámetros de conexión así como la identidad de las operadoras de red a los que puede accederse a través del eNB. Mediante esta interfaz se realiza la función de paging para forzar al equipo de usuario, que no tenga una conexión de control establecida con el eNB, inicie un acceso a la red.

Transferencia de paquetes IP de los usuarios, los servicios de transferencia entre un eNB y un equipo de usuario se denominan servicios portadores de radio Radio Bearers, estos servicios sólo soportan tráfico IP. Cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos de radio, así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio (scheduling).

Transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB, indispensable para poder gestionar el uso de los servicios portadores de radio así como para poder realizar cualquier gestión de señalización con la red troncal. La conexión de control se realiza mediante el protocolo Radio Resource Control (RRC).

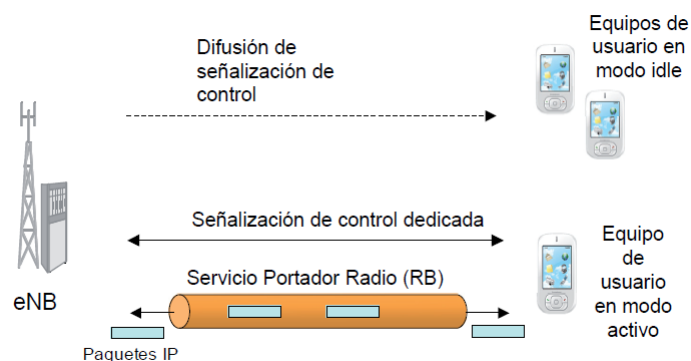


Figura 2.9: Mecanismo de transferencia de información de la interfaz de radio [5].

Interfaz S1: El plano de usuario de esta interfaz S1-U (S1 User Plane), proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNB y S-GW sin garantías de entrega ya que está basado en el protocolo UDP y que no soporta ni mecanismos de control de errores ni de control de flujo. Este servicio de transferencia a través de la interfaz S1-U se denomina servicio portador S1 (S1 bearer). El plano de control S1-MME o S1-C, se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la entidad MME de la red troncal. Algunos de los procedimientos son:

- Procedimientos para establecimiento, modificación y liberación de recursos de los servicios portadores tanto en la interfaz radio (servicio portador de radio o RB) como en la interfaz S1 (S1 bearer). La concatenación de un servicio portador de radio y un servicio portador S1 constituye el servicio portador completo que ofrece la red de acceso E-UTRAN y se denomina E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer). El establecimiento de estos servicios portadores los cuales constituyen el plano de usuario para la transferencia del tráfico IP se controlan desde el MME.
- Procedimientos de handover entre eNBs. Si la red E-UTRAN decide que un terminal debe cambiar de eNB durante una conexión y no existe una interfaz X2 entre los dos eNBs involucrados, la interfaz S1-MME se utiliza para articular el procedimiento de handover. A través de la interfaz S1-MME, el MME puede establecer un nuevo contexto en el eNB destino asociado al terminal que va a realizar el cambio con toda la información relativa a la configuración de los servicios portadores que tiene establecidos el usuario así como las claves de seguridad. De esta forma, el restablecimiento del servicio a través del nuevo eNB puede hacerse mucho más rápido ya que se evita el tener que ejecutar de nuevo los mecanismos para el establecimiento de los servicios portadores en la interfaz radio así como los mecanismos de seguridad.
- Procedimiento de aviso (Paging): Como se menciona anteriormente una de las funciones del MME es la localización de los equipos de usuario en la red. Cuando un usuario se encuentra en el modo idle y el MME quiere forzar que pase a modo activo, se ordena a través de la interfaz S1-MME la ejecución del mecanismo de aviso en todos los eNBs en donde se espera que se encuentre el terminal.
- Procedimiento de envío de los mensajes de señalización de control que fluyen entre el MME y el equipo de usuario de forma transparente entre MME y eNB. Estos mensajes corresponden a los protocolos NAS.

La interfaz S1 permite que los eNB estén conectados simultáneamente a varios MME y/o S-GW, esto se conoce como S1-flex y permite que la red sea más robusta ante fallos en la red troncal ya que el correcto funcionamiento del eNB no está ligado a un único nodo de la red troncal. Además, permite que el eNB pueda proporcionar acceso a nodos de redes troncales de diferentes operadoras de red que compartan la red de acceso. Por otro lado, debido a que cada terminal de usuario de la red tiene asociado un MME el cual realiza el seguimiento de su estado, la frecuencia a la que debe cambiarse el nodo MME que controla el servicio del terminal puede reducirse debido a que puede accederse al mismo MME desde una mayor cantidad de eNBs. Esto permite la reducción de la señalización necesaria para intercambiar información de los usuarios entre los HSS y MME. S1-flex también permite realizar un balance de carga entre E-UTRAN y los nodos de la red troncal.

Interfaz X2: Al igual que el plano de usuario de S1, el plano de usuario de X2 también proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNBs sin garantías de entrega y sin soporte de mecanismos de control de errores y de control de flujo. La transferencia de datos de usuario entre eNBs se realiza únicamente durante los procedimientos de handover en los que los paquetes de usuario almacenados en el eNB antiguo se transfieren al eNB nuevo. De esta forma, el cambio de eNB durante el handover resulta más transparente al usuario ya que se reduce la posible pérdida de paquetes durante

el proceso.

Respecto al plano de control, entre las funciones y procedimientos soportados en la interfaz X2 se destacan:

- Soporte del mecanismo de handover entre eNBs: a través del plano de control se realiza la transferencia del contexto de un usuario del eNB antiguo al nuevo y se controla el mecanismo de transferencia de paquetes IP en el plano de usuario de X2. El contexto de usuario contiene información relativa a los servicios portadores de radio que tiene establecidos, claves de seguridad así como los datos sobre las capacidades del terminal.
- Indicador del estado de carga del eNB para realizar funciones de gestión de recursos de radio como la coordinación de interferencias entre celdas que operen en el mismo canal.

Interfaces entre componentes de la red troncal EPC:

Interfaz entre MMEs -S10-: Su principal función es el soporte del mecanismo de re-ubicación de la entidad MME. A través de esta interfaz se realiza la transferencia del contexto de un usuario que debe cambiarse de MME, por ejemplo por su movilidad.

Interfaz entre MME y S-GW -S11-: Permite controlar la operativa del plano de usuario en el EPC desde el MME. Los procedimientos soportados en esta interfaz permiten la creación, eliminación, modificación y cambio de los servicios portadores que los terminales tienen establecidos a través de la red troncal LTE. La interfaz S11 permite establecer el nexo entre el plano de control con las funciones del plano de usuario de la red troncal LTE. Las acciones a realizar sobre la interfaz S11 tienen su origen en los diferentes eventos relacionados con la señalización entre el terminal y la red troncal EPC como el registro de un terminal en la red, incorporación de un nuevo servicio portador EPS a una conexión, establecimiento de una nueva conexión con otra red externa e indicador de handover y eventos originados en la propia red EPC como notificaciones de que existe tráfico en el S-GW pendiente de ser enviado a un terminal en modo idle, modificación de servicios portadores iniciados por el P-GW y otros. La interfaz S11 también da soporte al proceso de re ubicación de la pasarela S-GW asociada a un terminal mediante la transferencia de contextos donde se almacena la información relacionada con la configuración del plano de usuario en el S-GW entre el S-GW antiguo y el nuevo. Además, cuando se ejecuta un procedimiento de handover que implica una re ubicación de S-GW, el MME controla los mecanismos de transferencia de paquetes entre los dos S-GW involucrados.

Interfaz entre MME y HSS -S6a-: Permite la transferencia de información desde la base de datos HSS y la entidad del plano de control MME del EPC. A través de esta interfaz se da soporte a distintas funciones como:

- Mantenimiento de información de gestión de la localización: el HSS mantiene información con la identificación del nodo MME que controla a cada usuario registrado en la red. Esta información es actualizada por el MME correspondiente a través de esta interfaz y permite que si el terminal se conecta a un nuevo MME por una cuestión de movilidad, dicho MME pueda recuperar la información que contenía el antiguo MME.

- **Autorización de acceso a la red LTE:** el HSS almacena los datos de subscripción de los usuarios que condicionan el acceso a los servicios que ofrece la red. El perfil de subscripción de un usuario se transfiere desde el HSS al MME, ya que es él quien está encargado de realizar las comprobaciones necesarias. Por ejemplo, el MME puede autorizar o no la conexión de un usuario a una red externa dependiendo de si dicha red externa forma parte o no de lista de redes externas permitidas según la subscripción del usuario.
- **Autenticación de los usuarios:** a través de esta interfaz el MME descarga la información necesaria para realizar la autenticación.
- **Notificación y descarga de la identidad de la pasarela PDN-GW que utiliza un usuario en una conexión.** El almacenamiento en la base de datos HSS de información relativa a las pasarelas PDN-GW que dan servicio al usuario se utiliza para proporcionar soporte a los mecanismos de movilidad entre LTE y otras redes no 3GPP. La interfaz también soporta escenarios de roaming donde la entidad MME de la red de una operadora puede acceder a la base de datos HSS de otra operadora.

Interfaz entre PDN-GW y S-GW -S5 y S8-: Estas interfaces proporcionan el soporte para la transferencia de paquetes de usuario entre ambas pasarelas S-GW y PDN-GW. La interfaz S5 se utiliza cuando ambas pasarelas pertenecen a la misma red mientras que la interfaz S8 es la utilizada en caso de escenarios de roaming donde el S-GW pertenece a la red visitada (denominada Visited PLMN) y el PDN-GW a la red matriz (denominada Home PLMN). Ambas interfaces S5 y S8 admiten dos implementaciones diferentes: una basada en el protocolo GPRS Tunnel Protocol (GTP) y otra basada en el protocolo PMIPv6. La implementación basada en GTP proporciona funciones de creación, eliminación, modificación y cambio del servicio portador del plano de usuario entre S-GW y PDN-GW de los usuarios conectados a la red LTE. En el caso de la implementación basada en PMIPv6, no se soporta ninguna gestión de servicios portadores entre PDN-GW y S-GW de forma que, estrictamente el servicio portador EPS de la red LTE se extiende desde el equipo de usuario hasta el S-GW y no hasta el PDN-GW, como sería el caso de utilizar GTP. Esto es debido a que el protocolo PMIPv6 está concebido para ofrecer exclusivamente un servicio de movilidad entre el S-GW y el PDN-GW y no dispone de los mecanismos necesarios para señalar parámetros de QoS.

Interfaz entre PDN-GW y redes externas -SGi-: La interfaz SGi soporta la interconexión tanto a redes IPv4 como IPv6. Desde la perspectiva de la red externa, el PDN-GW es visto como un router IP convencional. Sobre esta base, existen dos modelos básicos de interconexión de la red LTE con la red externa: acceso transparente y acceso no transparente. En el modelo de interconexión transparente, la dirección IP asignada al terminal es válida en la propia interfaz SGi con la red externa, de forma que el terminal es “visible” en la red externa a la que proporciona acceso la pasarela PDN-GW a través de dicha dirección. Por otro lado, en el modelo no transparente, la red LTE ofrece un acceso a una red externa remota de forma que el espacio de direcciones utilizado por los terminales pertenece al espacio de direcciones de la red externa remota. En este modelo puede ser necesario que el PDN-GW participe por ejemplo en funciones de autenticación del usuario y asignación de direcciones dinámicas pertenecientes a la red remota.

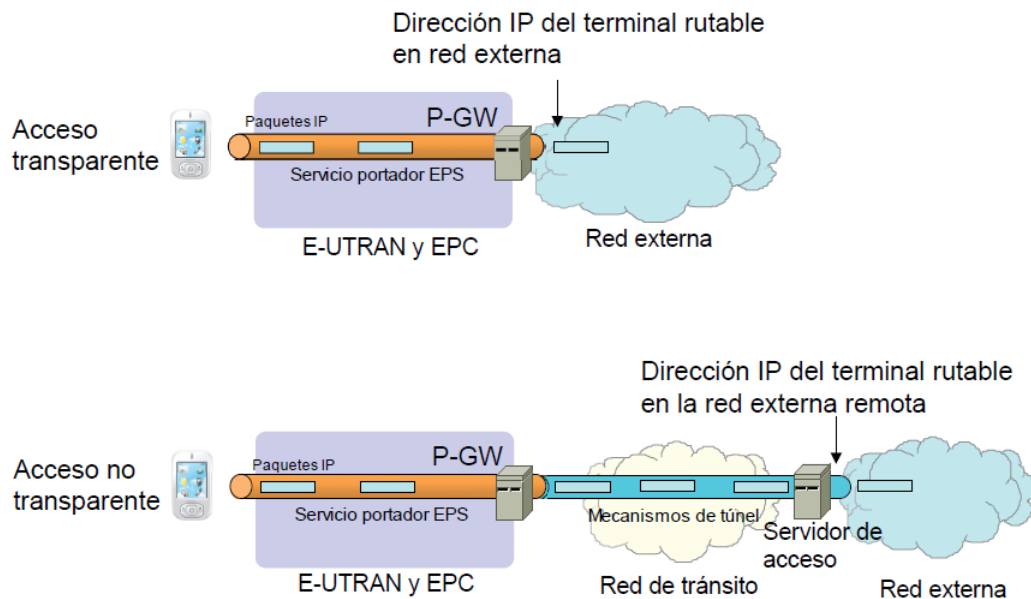


Figura 2.10: Modelos de interconexión a través de la interfaz S-Gi [5].

La interconexión entre los diferentes equipos de una red LTE se realiza a través de una red IP. Por tanto, la infraestructura de una red LTE, además de los equipos propios que implementan las funciones del estándar 3GPP, también integra otros elementos de red propios de las redes IP como routers, servidores Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores Domain Name Server (DNS) para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP.

2.4.3. Protocolos

Los protocolos utilizados se dividen en un Plano de Usuario y un Plano de Control, el Plano de Usuario abarca los protocolos utilizados para el envío de paquetes IP correspondientes a los equipos utilizados por los terminales de usuario, mientras que el Plano de Control abarca los protocolos utilizados para sustentar las funciones y procedimientos de las distintas interfaces.

Pila de protocolos utilizados por la interfaz de radio entre el eNB y el terminal de usuario:

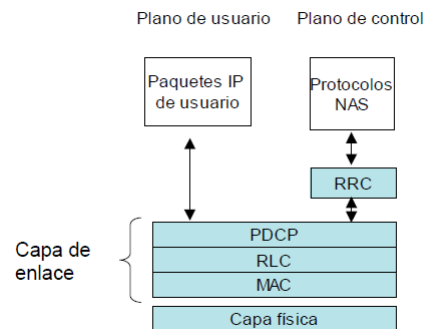


Figura 2.11: Protocolos de la interfaz de radio entre eNB y UE [5].

Protocolos del plano de usuario:

- **Packet Data Convergence Protocol (PDCP):** Constituye la capa superior del stack de protocolos, encargada de proporcionar el punto de acceso al servicio portador de radio Radio Bearer. Los paquetes IP del terminal de usuario son entregados y recibidos a través de este protocolo. Esta capa se encarga de la compresión del encabezado de los paquetes IP y del cifrado del contenido. Este protocolo agrega un encabezado a los paquetes IP el cual contiene un número de secuencia para identificar los paquetes, garantizar el orden en la entrega y detectar posibles duplicados.
- **Radio Link Control (RLC):** Permite enviar los paquetes PDCP entre el eNB y el terminal de usuario de forma fiable, para ello realiza mecanismos de control de errores.
- **Medium Access Control (MAC):** Esta capa es quien se encarga de controlar el acceso de radio por lo cual soporta funciones de scheduling dinámico entre equipos de usuario, teniendo en cuenta las prioridades. La capa MAC multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios Radio Bearer y realiza control de errores mediante el mecanismo Hybrid ARQ (HARQ). Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC son los canales lógicos. (Ver 2.4.4).
- **Capa física:** Es la capa encargada de realizar la transmisión a través del canal de radio. Realiza la codificación del canal, el procesamiento asociado a las técnicas MIMO y el mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo. Tal como se vio en 2.3, en el enlace ascendente la capa física se basa en un esquema SC FDMA mientras que en el enlace descendente se utiliza OFDMA.

Protocolos del plano de control:

Los protocolos del plano de control utilizan los mismos protocolos de capa de enlace y de capa física tal como se observa en la figura 2.11.

- **Radio Resource Control (RRC):** Esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNB y un terminal de usuario. Se encarga de los mecanismos de gestión de los Radio Bearer, de la señalización necesaria para los mecanismos de handover, difusión de parámetros del sistema y señalización necesaria para el mecanismo de paging. El servicio de transferencia que ofrece la capa PDCP para el envío de los mensajes de señalización del protocolo RRC se denomina servicio portador de señalización (Signalling Radio Bearer, SRB).
- **Non Access Stratum (NAS):** Los protocolos NAS son un conjunto de protocolos que se extienden desde el MME hasta el equipo de usuario. Los mensajes de los protocolos NAS son transparentes para la interfaz de radio y van encapsulados en la parte de datos de los paquetes RRC. Las funciones que cumplen estos protocolos incluyen autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

Protocolos utilizados por las interfaces S1 y X2:

Estos protocolos se dividen en dos grupos: los correspondientes a la capa de red radio (Radio Network Layer) y la capa de red de transporte (Transport Network Layer).

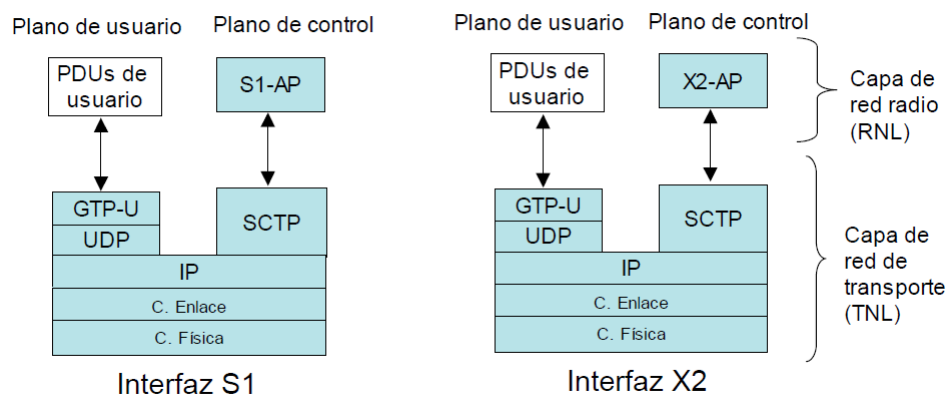


Figura 2.12: Protocolos utilizados por las interfaces S1 y X2 [5].

El plano de usuario de la interfaz S1 como el de X2 utilizan el protocolo GPRS Tunneling Protocol para encapsular los paquetes IP del usuario, estos paquetes se transportan sobre una interfaz UDP/IP. Paquetes IP de múltiples usuarios son multiplexados y enviados por GPRS. Los paquetes de una determinada portadora poseen una etiqueta la cual identifica el túnel.

Respecto al plano de control de la interfaz S1, la capa Radio Network Layer consiste en el protocolo S1-AP (S1 - Application Part). Este protocolo sustenta todas las funciones de la interfaz S1. La transferencia de señalización del protocolo S1-AP entre el MME y el eNB se realiza a través del protocolo Stream Control Transmission Protocol. Por otro lado, el protocolo utilizado en el plano de control de la interfaz X2 es X2-AP.

Protocolos utilizados en las interfaces de la red EPC

Las interfaces utilizan como capa de red una red IP, a diferencia de lo que ocurría en otras familias 3GPP donde algunas interfaces estaban soportadas sobre los protocolos SS7 o ATM.

Todas las interfaces para el transporte de información del plano de usuario entre los elementos de la red troncal EPC utilizan el protocolo GTP-U (GPRS Tunneling Protocol User Plane) salvo las interfaces entre el PDN-GW y S-GW. El protocolo GTP-U proporciona un mecanismo de encapsulado para el envío de los paquetes IP del usuario, el encabezado de este protocolo ocupa 6 bytes como mínimo e incluye un campo identificador de túnel TEID (Tunnel Endpoint Identifier) y parámetros como identificadores de secuencia y longitud del payload.

Interfaces	Nodos
S1-U	S-GW <->eNB
S5/S8	S-GW <->P-GW
S4	S-GW<->SGSN
S12	RNC<->SGSN
X2-U	eNB <->eNB
S16	SGSN <->SGSN

Cuadro 2.1: Interfaces basadas en el protocolo GTP-U.

El plano de control de las interfaces del EPC utilizan el protocolo GTP-C (GPRS Tunneling Protocol Control Part), mediante el mismo se cumplen funciones relacionadas al control de sesiones y gestión de movilidad del equipo de usuario.

Interfaces	Nodos
S11	S-GW <->MME
S5/S8	S-GW <->P-GW
S10	MME <->MME
S3	MME <->SGSN
S4	S-GW <->SGSN
S16	SGSN <->SGSN

Cuadro 2.2: Interfaces basadas en el protocolo GTP-C.

Otro protocolo utilizado en las interfaces del EPC es el protocolo Diameter el cual es utilizado para sustentar funciones de Autenticación, Autorización y Accounting (AAA). La transferencia de los mensajes Diameter entre nodos se realiza a través de un protocolo de transporte orientado a conexión como lo son TCP o SCTP.

Interfaces	Nodos
S6a, S6d	HSS <->MME, SGSN
SWx, STa, SWa SWm, S6b, SWd	3GPP AAA Server <->HSS, Red no-3GPP segura, Red no-3GPP no segura, ePDG, P-GW, 3GPP AAA Proxy
Gx, Gxa, Gxc, Rx, S9	PCRF<->P-GW, S-GW, AF, PCRF
S13, S'13	EIR<->MME, SGSN

Cuadro 2.3: Interfaces basadas en el protocolo Diameter.

Un protocolo alternativo al GTP utilizado por las interfaz S5/S8 entre S-GW y PDN-GW es el protocolo PMIPv6 (Proxy MIPv6), dicho protocolo fue especificado por IETF para gestionar la movilidad a nivel de capa de red IP. Al igual que GTP, PMIPv6 resuelve la movilidad de forma transparente al equipo de usuario, es decir, sin necesidad de que éste participe en la señalización pertinente.

Interfaces	Nodos
S5/S8	S-GW <->PDN.GW
S2a	PDN-GW <->red no 3GPP
S2b	PDN-GW <->ePDG

Cuadro 2.4: Interfaces basadas en el protocolo PMIPv6.

Para la gestión de movilidad de los equipos de usuario (EPS Mobility Management, EPM) y la gestión de las sesiones para el establecimiento de la conectividad entre el equipo de usuario y la pasarela PDN-GW (EPS Session Management, ESM) la 3GPP desarrolló los protocolos Non Access Stratum (NAS). Los protocolos NAS se soportan entre el equipo de usuario y un nodo MME y se han desarrollado específicamente para E-UTRAN.

2.4.4. Clasificación de Canales

Los canales usados en LTE son similares a los utilizados en UMTS y se dividen en canales lógicos, canales de transporte y canales físicos.

Canales Lógicos

Los canales lógicos son divididos en 5 canales de control y 2 canales de tráfico. Los canales de control son usados para transmitir la información del plano de control mientras que en los canales de tráfico viaja la información del plano de usuario.

- *Broadcast Control Channel (BCCH)*: es un canal de Downlink que se utiliza para información de control de broadcast.
- *Paging Control Channel (PCCH)*: es un canal de Downlink utilizado por la red cuando no se sabe el location cell del UE o cuando el UE recibe una llamada.

- *Common Control Channel (CCCH)*: canal que transmite información de control entre el UE y la red. Este canal es utilizado por el UE cuando no existe una conexión RRC con la red.
- *Multicast Control Channel (MCCH)*: es un canal de Downlink punto-multipunto utilizado para la transmisión de información de control en MBMS. Este canal es utilizado por los UE que reciben Multimedia Broadcast and Multicast Service (MBMS).
- *Dedicated Control Channel (DCCH)*: es un canal bidireccional que transmite información de control punto a punto. Es usado por el UE cuando existe una conexión RRC establecida.

La información de plano de usuario es transmitida por los canales de tráfico.

- *Dedicated Traffic Channel (DTCH)*: es un canal punto a punto para la transmisión de información de usuario. Puede existir un DTCH en sentido Uplink y uno en sentido Downlink.
- *Multicast Traffic Channel (MTCH)*: es un canal de Downlink punto-multipunto para la transmisión de tráfico de datos desde la red hacia el UE. Este canal es solamente utilizado por los UE que reciben MBMS.

Canales de Transporte

Los canales lógicos se mapean en los canales de transporte para luego poder enviar la información en los canales físicos. Los canales de transporte se dividen en 4 canales de Downlink y 2 canales de Uplink.

Canales de Downlink

- *Broadcast Channel (BCH)*: canal por el cual se transmite información de broadcast de forma continua para todas las celdas.
- *Downlink Shared Channel (DL-SCH)*: este canal soporta funciones como ser HARQ, AMC, transmisiones MBMS y puede ser puesto en broadcast en toda la celda.
- *Paging Channel (PCH)*: este canal es enviado por broadcast en toda la celda.
- *Multicast Channel (MCH)*: en este canal se mapea el canal Multicast Control Channel y es enviado por broadcast en toda la celda.

Canales de Uplink

- *Uplink Shared Channel (UL-SCH)*: este canal soporta funciones como ser HARQ, AMC y transmisiones MBMS y puede ser enviado en broadcast por toda la celda.
- *Random Access Channel (RACH)*: es el canal utilizado por el UE para acceder a la red.

Canales físicos

Los canales de transporte son mapeados directamente en canales físicos, aunque existen algunos canales físicos que son utilizados a nivel de capa solamente, por lo cual no hay vinculación o correspondencia alguna con los canales de transporte.

Los canales físicos se pueden separar en canales de Downlink y Uplink, siendo en el caso de esta tecnología, 6 y 3 canales respectivamente.

Downlink

- *Physical Broadcast Channel (PBCH)*: como hipótesis se asume que cada subtrama es auto contenida pudiendo decodificarse los canales de transporte contenidos en una sola de ellas.
- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)*: este canal se encarga de informar al móvil en cada subtrama sobre el número de símbolos OFDM utilizados en el PDCCH.
- *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*: este canal informa al móvil acerca de la asignación de recursos de PCH y DL-SCH.
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)*: es el canal encargado de transmitir Hybrid ARQ ACK/NAK en respuesta a las transmisiones de Uplink.
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*: este canal es quien transporta el DL-SCH y PCH.
- *Physical Multicast Channel (PMCH)*: canal encargado de transportar por el medio físico el MCH.

Uplink

- *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*: es el canal encargado de transmitir Hybrid ARQ ACK/NAK en respuesta a las transmisiones de Downlink, así como los reportes CQI y scheduling request.
- *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*: canal encargado de transportar el UL-SCH.
- *Physical Random Access Channel (PRACH)*: es el canal que permite llevar a cabo el preámbulo de acceso aleatorio a la red.

2.4.5. Mapeo entre canales físicos y lógicos

Para poder transmitir la información desde el nivel de Radio Link Control hacia el Medium Access Control, existen los canales lógicos. Luego los canales de transporte permiten la comunicación de información desde el Medium Access Control hacia la capa física y por último, gracias a los canales físicos se puede transmitir la información en el medio.

La figura 2.13 muestra como se realiza el mapeo de los canales lógicos en los canales de transporte y como estos se mapean en los canales físicos.

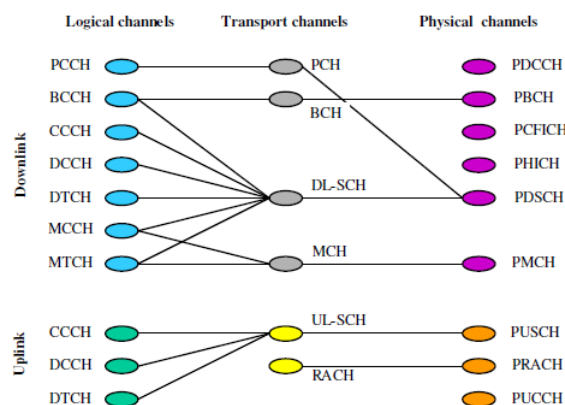


Figura 2.13: Mapeo de canales [4].

2.5. Scheduling de Paquetes

La función del scheduling de paquetes es la de proveer de manera dinámica recursos de radio a los usuarios para que se realice de manera correcta la transmisión de información en la interfaz de radio.

El scheduling cumple varias funciones, entre las cuales se encuentran, decidir el usuario que va realizar la transmisión, decidir los recursos de radio, como se realiza la modulación y su codificación. Para estas distintas tareas el scheduling tiene en cuenta los parámetros de calidad de servicio vinculados a los distintos servicios, como también el estado del canal asociado a cada usuario y tamaños de buffer.

Scheduling en el DL

El proceso de scheduling se realiza en eNB para ambos sentidos de transmisión, Downlink y Uplink. Como el scheduler necesita información del estado del canal, los terminales deben reportar condiciones de canal mediante Channel Status Reports. Estos reportes no tienen información del estado del canal que tiene un usuario en el Downlink sino que plantean una recomendación de los parámetros de transmisión en el Downlink según como es percibido el canal.

Scheduling en el UL

Para el caso de Uplink los eNB's pueden obtener la estimación del canal analizando la señal recibida en los PRB (Physical Resource Block) que fueron asignados a un usuario en particular para la transmisión de datos. Esta manera de obtención de información necesita que el terminal este transmitiendo datos. Una manera más eficiente es que el eNB pueda determinar que los usuarios activos transmitan señales particulares denominadas Sounding Reference Signals (SRS) para obtener la estimación de canal en cualquier PRB. Las señales SRS son reconocidas por los eNB y son señales que los usuarios transmiten periódicamente en un ancho de banda determinado por el eNB.

Estado del Buffer

Es necesario conocer el estado de los buffers a la hora de asignar recursos en los procesos de scheduling. Para el caso de DL el eNB conoce el estado del buffer, sin embargo para el UL se establecieron una serie de mecanismos donde el terminal puede informar al scheduler de Uplink en el eNB, el estado del mismo.

La manera que tienen los terminales de informar el estado de sus buffers es mediante el Buffer Status Report (BSR) enviado en cada subtrama. EL BSR informa la cantidad de datos que hay en el buffer del terminal para cada canal lógico. Esta información sólo se puede enviar si el terminal tiene recursos asignados, de no ser así el terminal debe solicitar permiso al eNB para poder transmitir mediante el Scheduling Request (SR) o mediante el RACH.

El SR tiene una ventaja con respecto al RACH debido a que es un mecanismo de acceso al medio libre donde no pueden existir colisiones. Esta característica permite ser más rápida para obtener la asignación de recursos en UL. Cuando el terminal obtiene un Uplink grant (mensaje de acceso permitido) puede comenzar a enviar los BSR en su transmisión.

2.5.1. Importancia del Scheduler

Una de las tareas del scheduler es la elección de la modulación y codificación que mejor se adapte a las transmisiones de los usuarios durante el envío de información. Durante la transmisión de información de cada usuario, el enlace se encuentra en un proceso de adaptación dinámico donde la tasa binaria asignada a un usuario activo, varía en función de la calidad del canal.

El usuario podrá experimentar una tasa binaria alta si las condiciones del canal son buenas y una tasa binaria baja en caso contrario. Para el UL la estimación de la calidad del canal se obtiene de los SRS (Sound Reference Signal) y para el DL esa información se encuentra en los CSR (Channel Status Reports). Una vez obtenida la calidad del canal se puede determinar un esquema de modulación y codificación que permita garantizar un determinado BER (Bit Error Rate) el cual depende del servicio ofrecido y la codificación disponible.

Los esquemas de modulación utilizados para el DL son QPSK, 16 QAM y 64 QAM,

en el UL se utiliza QPSK y 16 QAM. Como caso particular, se puede utilizar en algunos terminales 64 QAM en UL.

La continua adaptación que tiene el enlace es realizada mediante la selección del Transport Format (TF), el cual especifica cómo se realizan las transmisiones en la interfaz de radio para una determinada portadora de radio. El mismo indica como se organizan las distintas transmisiones, es decir, especifica el tamaño de los Transport Blocks (TB), esquemas de modulación y vínculos con las antenas en caso de transmisiones MIMO. El Downlink Control Indicator (DCI) es el encargado de enviar la información de los Transport format como también el número de PRBs y número de PRBs asignados a un usuario en particular.

Calidad de Servicio y Calidad de Experiencia

En este capítulo se mencionan los distintos servicios demandados por los usuarios en una red móvil. Se definen los conceptos de Calidad de Servicio y Calidad de Experiencia basados en el Reporte Técnico TR 126 del DSL Forum y se analiza el método que utiliza la tecnología LTE para realizar el correcto manejo de la Calidad de Servicio en la red.

Al final del capítulo se mencionan distintos métodos para estimar la Calidad de Experiencia percibida por lo usuarios al utilizar el servicio de VoIP y servicios de acceso a Internet best effort.

3.1. Servicios demandados por usuarios

- SMS

A partir del desarrollo de las comunicaciones móviles surge como necesidad el envío de información breve y concisa de forma eficaz, rápida y económica entre los usuarios de telefonía móvil. Es así como surge el servicio de mensajería corta, SMS *-del inglés, short message service-*, el cual permite el envío de cierta cantidad de caracteres como mensaje de texto plano. Este servicio se destaca por el gran alcance y desarrollo que ha tenido en los últimos años permitiendo adicionalmente a los proveedores brindar nuevos servicios de valor agregado.

- MMS

En conjunto con el desarrollo tecnológico y la incorporación de nuevas funcionalidades en los terminales móviles se agrega el servicio MMS, *-del inglés, multimedia messaging service-*, el cual permite al igual que el SMS transmitir información entre terminales pero brindando la posibilidad de adjuntar contenido multimedia como imágenes, videos y texto enriquecido, entre otros.

- Chat

El servicio de chat brindado sobre los terminales móviles otorga movilidad al conocido y popular chat de Internet, permitiendo a los usuarios mantenerse en contacto por esta vía sin la necesidad de estar frente a un PC.

- Pago a través del terminal

Este servicio permite a un usuario de telefonía móvil realizar transacciones económicas a partir del terminal de forma rápida, segura y sencilla. Consiste simplemente en asociar al número de móvil una tarjeta de crédito o débito, permitiendo que los gastos generados por medio del terminal sean cargados a dicha tarjeta. Al tratarse de un servicio emergente, conocido normalmente como e-payment o m-commerce, existe cierto rechazo a incorporarlo como forma de pago convencional por parte de la sociedad.

- PTT

PTT -del inglés, *push to talk*- brinda un servicio similar al comúnmente conocido como *Walkie Talkie*, permitiendo a un conjunto de personas mantenerse en contacto permanente utilizando la red de datos móviles. Este servicio es unidireccional lo cual hace que cada usuario deba esperar turno para hablar. Pero presenta como gran ventaja, que los usuarios puedan estar conectados mundialmente a bajo costo.

- Video Streaming

Consiste en la distribución y descarga de video on-demand, es decir a medida que el usuario lo visualiza en el terminal. Este método de visualización almacena segmentos de video en un buffer lo cual hace que el terminal no requiera de grandes cantidades de memoria. Como contrapartida requiere de grandes cantidades de tráfico en la red, si el usuario desea visualizar el video nuevamente deberá volver a descargarlo.

- Acceso a Internet

Hoy en día la tendencia de la sociedad a estar en línea ha llevado a los usuarios a requerir el acceso a Internet de forma ininterrumpida, esto hace que las personas estén dispuestas a pagar un poco más para acceder a servicios inalámbricos y permanentes a través del terminal móvil.

- Descarga de aplicaciones

Dada la popularidad de teléfonos inteligentes -*Smartphones*- cada vez es más común que los usuarios descarguen aplicaciones de uso corriente en estos dispositivos, lo cual permite el desarrollo de plataformas y planes específicos para ofrecer dichas aplicaciones.

El desafío principal de la red LTE es la necesidad de que los servicios que se ofrecen tengan el nivel de calidad esperado por el usuario. Los términos de calidad de servicio y de calidad de experiencia son dos conceptos distintos que permiten estudiar el desempeño de la red y saber si se está cumpliendo con las expectativas que tienen los usuarios respecto a la calidad con la cual desean percibir cada tipo de servicio.

3.2. Calidad de servicio

El Reporte Técnico TR-126 del DSL Forum [10] define la Calidad de Servicio (QoS por sus siglas en Inglés) como una medida del desempeño de la red a nivel de paquete,

vista desde la perspectiva de la red propiamente dicha. También refiere a un conjunto de tecnologías que permiten manejar los efectos indeseados de congestión así como administrar los recursos de la red para poder ofrecer servicios diferenciados. Algunos parámetros típicos de medición de QoS pueden ser por ejemplo: la pérdida de paquetes en la red, el retardo, el jitter y el ancho de banda.

LTE brinda diferentes servicios con distinta QoS para las conexiones IP entre el usuario y la red. En una conexión PDN los paquetes IP son adaptados para los diferentes requerimientos de transmisión según el servicio que el usuario desea tener. Por ejemplo, la tasa de transferencia de bits/s, retardos de transmisión y tasa de pérdida de paquetes son modificados de acuerdo al servicio que solicite el usuario.

Debido a que LTE puede brindar servicios con diferentes características, los parámetros anteriormente mencionados se adaptan a las prestaciones de QoS de las conexiones PDN haciendo un uso eficiente de recursos disponibles y ofreciendo un buen servicio al usuario.

La calidad de servicio de LTE se gestiona con lo que se denomina servicio portador EPS (EPS Bearer Service). El servicio portador EPS constituye un servicio para la transmisión de paquetes IP al cual se le asocian parámetros de QoS y filtros de paquetes necesarios para identificar los paquetes que deben recibir dicho QoS.

En toda conexión PDN debe existir un servicio portador EPS en donde se envía el tráfico IP del usuario. Los parámetros de QoS del servicio portador establecido, están determinados por la información de subscripción de usuario almacenada en el HSS. El servicio portador EPS debe mantenerse activo durante la conexión PDN y al desactivarse se termina la conexión, cuando no se requiere un trato específico de QoS se utiliza un servicio portador por defecto.

Hay dos tipos de servicio portador: los de tasa de bit garantizados (GBR) y los de tasa de bit no garantizados (Non-GBR). Los servicios de tipo GBR son utilizados para servicios de transmisión en tiempo real como la transmisión de voz y video, este tipo de EPS tiene un ancho de banda mínimo reservado por la red y siempre consume recursos en una radio base sin importar de si es utilizado o no. Si el servicio portador GBR está implementado correctamente, no se debería experimentar pérdida de paquetes en el enlace de radio o en la red IP debido a congestión, estos tipo de servicios son definidos además con los valores mínimos de tolerancia de latencia y jitter requeridos por servicios de transmisión en tiempo real. Por otro lado, los servicios portadores Non-GBR, no tienen una reserva de ancho de banda en la red, ya que sólo brindan servicios del tipo best effort como por ejemplo descarga de archivos, e-mail y Web browsing. Estos portadores de servicios experimentarán pérdida de paquetes cuando la red se encuentra con congestión.

3.2.1. Modelo de Calidad de Servicio

Los modelos de QoS posibilitan el establecimiento de condiciones para el comportamiento de un servicio de conexión orientado a la transmisión de paquetes. Las pres-

taciones de QoS de un servicio portador EPS dependen del servicio ofrecido que se seleccione.

Para definir el modelo de QoS que se utiliza en un servicio portador EPS se deben evaluar como máximo cuatro parámetros. Una vez evaluados estos cuatro parámetros el modelo de QoS agrega dos parámetros más, los cuales están vinculados al tipo de subscripción que el usuario tenga. La figura 3.1 muestra los diferentes parámetros que se consideran en un modelo de QoS para LTE.

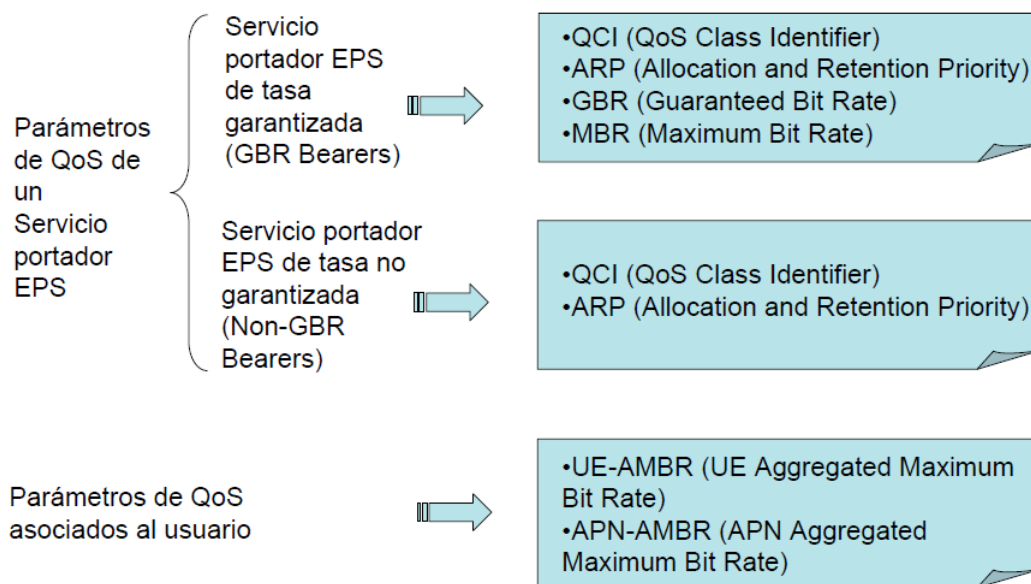


Figura 3.1: Parámetros de QoS [5].

Los servicios portadores EPS tienen asociados un mínimo de dos parámetros: QCI (QoS Class Identifier) y ARP (Allocation and Retention Priority). El parámetro QCI cumple la función de identificar el comportamiento a nivel de plano de usuario del servicio portador EPS y el parámetro ARP a nivel de plano de control.

El valor de QCI indica una determinada clase de servicio, la selección de este valor para un servicio portador EPS establece la utilización de parámetros específicos en todos los nodos de la red donde se procesa información a nivel de plano de usuario, como por ejemplo, scheduling, umbrales de control de admisión, parámetros de capa de enlace y de capa física. Estos parámetros pueden estar previamente configurados en los diferentes equipos de la red por el fabricante o por la propia operadora.

La figura 3.2 nos indica los diferentes valores de QCI según el servicio de portador donde se especifican parámetros de retardo, tasa de pérdida de paquetes cuando no existe congestión y nivel de prioridad. El valor del nivel de prioridad es utilizado por el scheduler para la asignación de recursos en los servicios portadores de radio en condiciones de exigencia de la red, como ser el estado de congestión.

QCI	Resource type	Priority	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example services
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Conversational voice
2		4	150 ms	10^{-3}	Conversational video (live streaming)
3		3	50 ms	10^{-3}	Real time gaming
4		5	300 ms	10^{-6}	Non-conversational video (buffered streaming)
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-3}	IMS signaling
6		6	300 ms	10^{-6}	Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100 ms	10^{-6}	Voice, Video (live streaming), Interactive gaming
8		8	300ms	10^{-3}	Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
9		9		10^{-6}	

Figura 3.2: Parámetros de QCI [5].

El parámetro ARP es un indicador de prioridad para los establecimientos, modificación y culminación de los servicios portadores. En LTE se puede llegar a soportar un total de 15 prioridades. Este parámetro se utiliza como mecanismo de control de congestión, de acuerdo a las distintas prioridades se pueden liberar o asignar recursos disponibles en la red.

Cuando se establecen servicios portadores EPS con tasa garantizada se utiliza el parámetro GBR el cual indica la tasa en bits/s que debe brindar el servicio portador. El parámetro MBR es un parámetro que se utiliza para determinar una cota máxima de tasa de transmisión. Cuando el tráfico excede el valor de MBR, dicho volumen puede ser descartado. De esta manera se puede tener un mecanismo de control de tasa.

En el sistema LTE solamente se permiten valores de GBR y MBR iguales y en futuras tecnologías se espera tener un servicio portador de tasa garantizada donde la tasa media sea inferior a la tasa pico.

Es importante destacar que cuando se cursa una tasa de datos inferior o igual al valor del parámetro GBR en un servicio portador, no debe existir pérdidas de paquetes por congestión. Debido a esto, los servicios de tasa garantizada deben tener un control de admisión para reservar una cantidad de recursos que permitan garantizar una tasa de transmisión. Por otro lado, los servicios sin tasa garantizada no tienen este tipo de control, existiendo pérdidas de paquetes por congestión.

Además de los parámetros de QoS vistos anteriormente, existen dos parámetros más: UE-AMBR y APN-AMBR. Estos parámetros indican la máxima tasa de transferencia bit/s que pueden soportar los servicios portadores EPS sin tasa garantizada que tenga un usuario. El parámetro UE-AMBR indica una cota para la tasa máxima del equipo de usuario y el parámetro APN-AMBR una cota para la tasa agregada máxima del equipo de usuario con una red externa. Ambos parámetros están determinados en el tipo de suscripción que el usuario tenga.

3.2.2. Análisis de QoS

La recomendación G.1010 de la ITU-T determina los factores que inciden en la calidad de servicio visto desde el usuario extremo. Existen distintas categorías de QoS de acuerdo a la aplicación que utiliza el usuario extremo como ser la voz, video, imágenes y texto y según la categoría hay un conjunto de parámetros a estudiar que permiten conocer la adecuada satisfacción de los usuarios al momento de utilizar estas aplicaciones.

La recomendación G.1010 se focaliza en la percepción que un usuario tiene sobre un determinado servicio. Es decir, al cliente no le interesa como se implementa un servicio en particular sino como el mismo es ofrecido por distintas operadoras de acuerdo a parámetros de calidad de funcionamiento mundiales y vinculados al usuario. Por esta razón se establece que la calidad de funcionamiento se pueda representar por parámetros que cumplan las siguientes características:

- Los parámetros tengan en cuenta todos los aspectos del servicio visto desde el usuario.
- Se focalizan en los aspectos percibidos por el usuario.
- Sean independientes de las arquitecturas y tecnologías de la red.
- Sean medibles objetivamente o subjetivamente en el punto de acceso al servicio.
- Exista un vínculo con los parámetros de calidad de funcionamiento de la red.
- Que el proveedor del servicio pueda garantizar estos parámetros al usuario.

La recomendación establece una clasificación de los requisitos de calidad de funcionamiento de acuerdo a categorías de calidad de servicio en el usuario. Las figura 3.3 presenta los objetivos de calidad de funcionamiento esperados para servicios de audio y video, mientras que la figura 3.4 lo establece para servicios de datos.

Medium	Application	Degree of symmetry	Typical data rates	Key performance parameters and target values			
				One-way delay	Delay variation	Information loss (Note 2)	Other
Audio	Conversational voice	Two-way	4-64 kbit/s	<150 ms preferred (Note 1) <400 ms limit (Note 1)	< 1 ms	< 3% packet loss ratio (PLR)	
Audio	Voice messaging	Primarily one-way	4-32 kbit/s	< 1 s for playback < 2 s for record	< 1 ms	< 3% PLR	
Audio	High quality streaming audio	Primarily one-way	16-128 kbit/s (Note 3)	< 10 s	<< 1 ms	< 1% PLR	
Video	Videophone	Two-way	16-384 kbit/s	< 150 ms preferred (Note 4) <400 ms limit		< 1% PLR	Lip-synch: < 80 ms
Video	One-way	One-way	16-384 kbit/s	< 10 s		< 1% PLR	
NOTE 1 – Assumes adequate echo control.							
NOTE 2 – Exact values depend on specific codec, but assumes use of a packet loss concealment algorithm to minimise effect of packet loss.							
NOTE 3 – Quality is very dependent on codec type and bit-rate.							
NOTE 4 – These values are to be considered as long-term target values which may not be met by current technology.							

Figura 3.3: Objetivos de calidad de funcionamiento para audio y video [13].

Medium	Application	Degree of symmetry	Typical amount of data	Key performance parameters and target values		
				One-way delay (Note)	Delay variation	Information loss
Data	Web-browsing – HTML	Primarily one-way	~10 KB	Preferred < 2 s /page Acceptable < 4 s /page	N.A.	Zero
Data	Bulk data transfer/retrieval	Primarily one-way	10 KB-10 MB	Preferred < 15 s Acceptable < 60 s	N.A.	Zero
Data	Transaction services – high priority e.g. e-commerce, ATM	Two-way	< 10 KB	Preferred < 2 s Acceptable < 4 s	N.A.	Zero
Data	Command/control	Two-way	~ 1 KB	< 250 ms	N.A.	Zero
Data	Still image	One-way	< 100 KB	Preferred < 15 s Acceptable < 60 s	N.A.	Zero
Data	Interactive games	Two-way	< 1 KB	< 200 ms	N.A.	Zero
Data	Telnet	Two-way (asymmetric)	< 1 KB	< 200 ms	N.A.	Zero
Data	E-mail (server access)	Primarily one-way	< 10 KB	Preferred < 2 s Acceptable < 4 s	N.A.	Zero
Data	E-mail (server to server transfer)	Primarily one-way	< 10 KB	Can be several minutes	N.A.	Zero
Data	Fax ("real-time")	Primarily one-way	~ 10 KB	< 30 s/page	N.A.	<10 ⁻⁶ BER
Data	Fax (store & forward)	Primarily one-way	~ 10 KB	Can be several minutes	N.A.	<10 ⁻⁶ BER
Data	Low priority transactions	Primarily one-way	< 10 KB	< 30 s	N.A.	Zero
Data	Usenet	Primarily one-way	Can be 1 MB or more	Can be several minutes	N.A.	Zero
NOTE – In some cases, it may be more appropriate to consider these values as response times.						

Figura 3.4: Objetivos de calidad de funcionamiento para datos [13].

La figura 3.5 muestra como las aplicaciones se pueden clasificar en función de la pérdida de paquetes y la transmisión en un sentido.

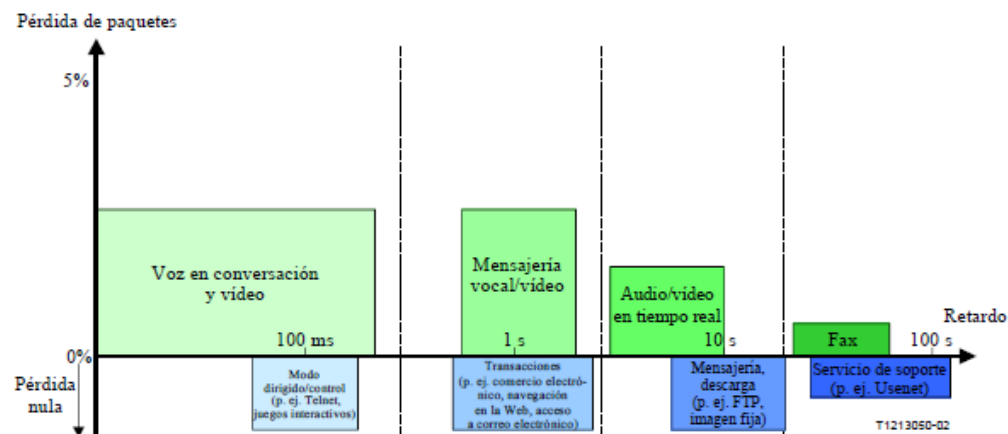


Figura 3.5: Requisitos de QoS de usuarios y servicios [13].

A partir de la figura anterior se puede dividir a los servicios de acuerdo a los que toleran o no la pérdida de paquetes de información. En la figura 3.6 se puede observar esta división y es una representación de un modelo de categorías de QoS de usuario extremo.

Tolera errores	Voz en conversación y video	Mensajería vocal/video	Audio/video en tiempo real	Fax
No tolera errores	Modo dirigido/control (p. ej. Telnet, juegos interactivos)	Transacciones (p. ej. comercio electrónico, navegación en la Web, acceso a correo electrónico)	Mensajería, descarga (p. ej. FTP, imagen fija)	Servicio de soporte (p. ej. Usenet)
	Interactivo (retardo <<1 s)	Pronta respuesta (retardo ~2 s)	Oportuno (retardo ~10 s)	No crítico (retardo >>10 s)

Figura 3.6: Modelo de QoS en el usuario extremo [13].

El modelo de categorías permite obtener las siguientes características:

- Tiene como base la percepción del usuario de las distintas degradaciones de un servicio de extremo a extremo, por lo cual puede ser utilizado independientemente de la tecnología de transporte.
- Permite indicar si un servicio es considerado aceptable o no por el usuario. Proporciona un límite superior y un límite inferior donde si se supera el límite superior se estará considerando al servicio como insatisfactorio y si se supera un límite inferior el servicio se seguirá considerando aceptable pero no se estará haciendo un uso eficiente de los recursos ya que se utilizan recursos de forma innecesaria.
- Permite determinar si se pueden transmitir datos de un servicio específico.
- Se muestra como se agrupan las degradaciones debido a la pérdida de paquetes y el retardo, sin indicar que un grupo es mejor o peor que otro.

3.3. Calidad de Experiencia en el extremo usuario

La Calidad de Experiencia (QoE) refiere al desempeño global del sistema desde el punto de vista de los usuarios; el TR-126 la define como una medida del desempeño extremo a extremo (o end-to-end en Inglés) en la capa de servicio y representa un indicador del nivel con el cual el sistema logra cumplir con las expectativas de los usuarios. Una medida clásica de QoE es el Mean Opinion Score (MOS), el cual es una medida subjetiva que permite cuantificar el impacto en la percepción que tiene el usuario del servicio.

No hay una relación lineal entre la medida subjetiva de QoE y los distintos parámetros objetivos que miden el desempeño del servicio como el bitrate de codificación, pérdida de paquetes, retardo, jitter y otros. Por lo general, la relación entre QoS y QoE es obtenida empíricamente.

El proceso de diseño de una red de servicios incluye:

- Análisis de los requerimientos del usuario final.
- Definición de los requerimientos de QoE de la capa de aplicación.
- Mapeo entre requerimientos subjetivos de QoE a requerimientos objetivos de la capa de red y aplicación.

En el siguiente esquema extraído de “DSL Forum Technical Report TR126” [10] se puede observar cual sería el proceso de diseño habitual de una red teniendo en cuenta si se cumplen con los niveles de QoE deseados.

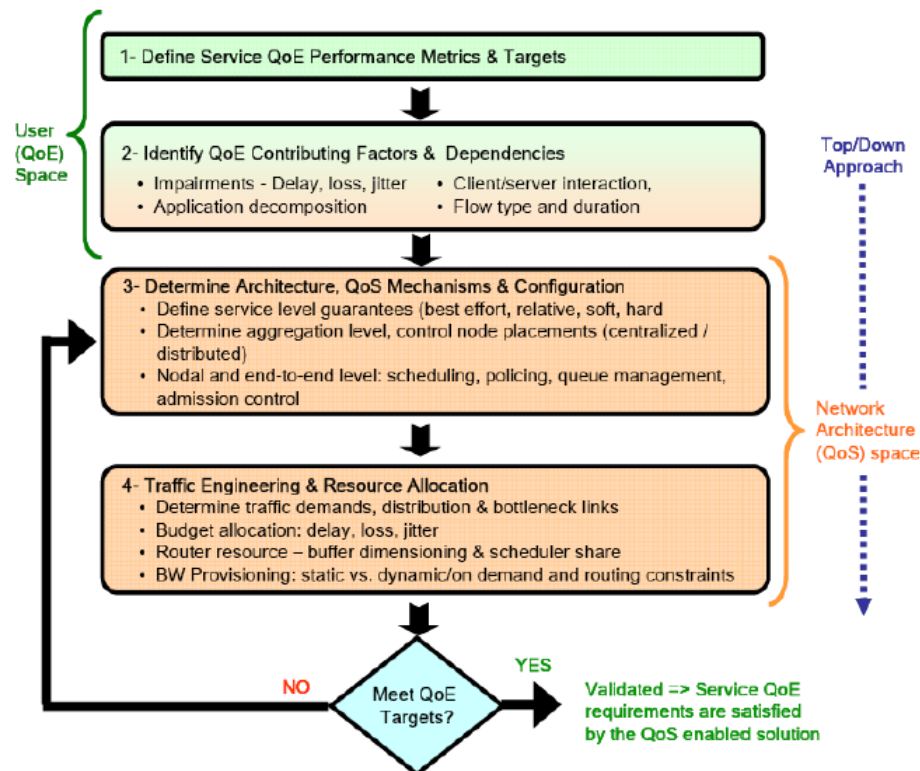


Figura 3.7: Proceso de diseño de red [10].

3.3.1. Calidad de experiencia de Voz sobre IP (VoIP)

Existen varios factores que afectan la calidad de experiencia de VoIP y se explican a continuación.

- **Speech Codec:** el codec seleccionado para la codificación de la voz tiene una fuerte influencia en la calidad final obtenida, debido a la calidad del codec propiamente dicha, así como la respuesta del codec a otros factores como: presencia de ruido ambiente, pérdida de paquetes y otros.
- **End-to-end delay:** el retardo extremo a extremo en una señal de voz es el tiempo medido desde que el sonido entra al transmisor en uno de los extremos, se codifica en una señal digital, viaja a través de la red y luego es regenerada por el receptor en el otro extremo. Es un parámetro muy importante que afecta directamente en la satisfacción del usuario y depende de la aplicación que se utilice. El retardo se puede producir en el terminal, en la red, en un servidor o en cualquier otro punto de la red. Existen diferentes tiempos de transmisión o retardo, como ser el retardo al establecer un servicio o el retardo que se obtiene a la hora de recibir información de la red.
- **Jitter:** este parámetro representa la variación en el retardo, causado por las diferencias en el tiempo necesario para que los paquetes atraviesen la red. El jitter es un parámetro importante debido a que la decodificación de la señal digital es un proceso sincrónico y se debe proceder a la misma tasa usada durante la codificación. Este parámetro puede ser corregido cuando se utiliza un buffer para eliminar la variación de tiempos que un usuario puede detectar.

- Pérdida de paquetes: en una red de paquetes, estos pueden perderse y no llegar a destino o retardarse un valor, provocando desestimación en la decodificación. La información perdida degrada la calidad de la voz.
- Eco: Debido a los retardos que posee una red IP este parámetro también es importante a la hora de considerar los factores que degradan la calidad de la voz.
- Nivel de señal: el nivel o la amplitud de la señal transmitida es determinada por ganancias en la amplitud y por las pérdidas a través de la red.
- Pérdida de información: este parámetro afecta directamente la calidad de información que percibe un usuario. No sólo hace referencia a los paquetes perdidos en una transmisión sino también a los efectos de degradación que son introducidos en una comunicación cuando no se elige una codificación adecuada para la transmisión de datos.

Existen varios métodos para el análisis de la calidad de experiencia en el usuario, el más destacado es el planteado por la recomendación de UIT-T G.107 [14] donde se presenta un algoritmo llamado el E-model el cual permite obtener un rating de las transmisiones realizadas.

El rating de transmisión, R, es una medida objetiva que indica la calidad de la conversación de voz para ancho de banda angostos. El valor de R es un valor obtenido de distintos parámetros como pueden ser: nivel de voz, ruido, distorsión, tipo de codec usado, pérdida de paquetes, retardos y eco.

Modelo computacional E-Model

El E-Model es un modelo computacional que se utiliza en la planificación de transmisiones donde intervienen los distintos parámetros antes mencionados. Estos parámetros no sólo son estudiados como afectan al sistema de manera individual sino también el modelo estudia como estos parámetros influyen de manera conjunta.

La salida de este modelo computacional es un valor R, valor que indica un rating determinado para la calidad de la transmisión de voz. Este valor tiene en consideración todos los parámetros que de manera directa o indirecta afectan la calidad del enlace de transmisión.

El valor R esta compuesto por:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e + A$$

- R_o : este factor representa la relación señal a ruido existente. Incluye las fuentes de ruido como ser sonido proveniente del propio circuito y conexiones, como también ruido de ambiente.
- I_s : factor que representa las deficiencias que ocurren con la señal de voz.
- I_d : factor que representa los distintos retardos introducidos en la transmisión.

- le: factor que representa las deficiencias que causan los codecs de baja tasa de bits.
- A: cuando el usuario tiene ventajas en el acceso, este factor permite disminuir las deficiencias.

Adicionalmente cada uno de estos factores están afectados por distintas variables cuya determinación excede el alcance del proyecto. Se deja para un posterior estudio la posibilidad de incluir este modelo para el análisis de calidad de experiencia de VoIP. Como alternativa se analiza la calidad de experiencia para este tipo de tráfico comprobando el cumplimiento de las condiciones establecidas por la norma G.1010.

3.3.2. Calidad de experiencia de servicios de datos best effort

Tal como ocurre con los servicios de voz y video, los parámetros que afectan la calidad de servicio ocurren en la capa de red y la capa de aplicación. Los parámetros fundamentales de medida de la calidad de experiencia para aplicaciones best effort de Internet son:

- Respuesta inicial del sistema (por ejemplo delay): tiempo desde que el usuario tipea una dirección URL hasta que comienza a ver que empezó la descarga de la página.
- Velocidad de descarga: generalmente este parámetro es comunicado a los usuarios a través de cuadros de diálogo que informan el estado de la descarga (por ejemplo porcentaje o número de bytes descargados del total de bytes) o a través de un medidor de velocidad de red.
- Consistencia de la velocidad de descarga: si la velocidad de descarga se mantiene constante el usuario tiene una percepción de cuando finalizará la descarga. Si por el contrario la velocidad de descarga varía, el tiempo de finalización de la descarga es incierto y el usuario no puede planificar como utilizar el período de manera eficaz. La tasa de error de bit, la congestión y la pérdida de paquetes tienen impacto en la consistencia de la velocidad de descarga.
- Visualización incremental: tiempo considerado antes de que haya contenido nuevo y comprensible a la vista. Por ejemplo, el caso en que el contenido comienza a actualizarse antes de que la descarga se complete. Tan pronto como el usuario tenga nueva información para considerar, la realidad de que la descarga aún está en progreso cobra menos importancia.
- Disponibilidad de acción: tiempo antes de que el usuario pueda tomar el siguiente paso en su proceso de búsqueda, por ejemplo, la aparición de un nuevo link o un nuevo botón de acción; al igual que el parámetro anterior esto es antes de que la descarga se complete.
- Tiempo hasta que se complete la descarga: además de la velocidad de descarga, la experiencia del usuario también se ve impactada por el tiempo absoluto que toma la descarga.
- Facilidad de uso: aplicación de interfaz de usuario.

- Contenido:
 - Calidad/Cantidad de información
 - Presentación de la información
- Disponibilidad de la fuente de contenido
- Seguridad y Privacidad: la seguridad puede impactar en otros parámetros, por ejemplo los retardos por encriptación y desencriptación.

La siguiente figura muestra los elementos involucrados en la calidad de experiencia para el servicio best effort de Internet.

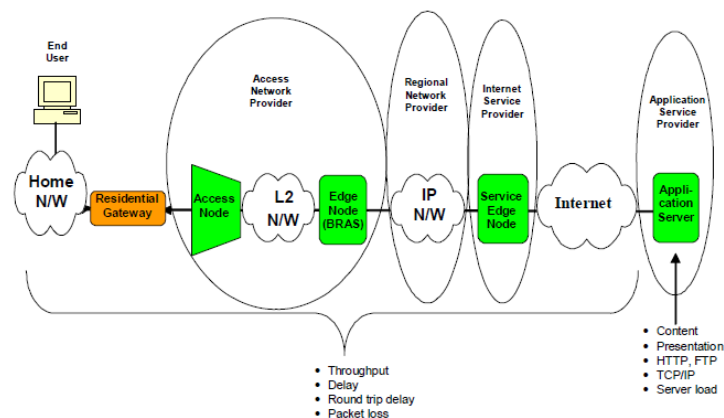


Figura 3.8: Best effort Internet access [10].

La Calidad de Experiencia para servicios de acceso a Internet best effort puede ser medida de tres maneras:

- Subjetivamente: utilizando un experimento controlado y participantes que puntúen la calidad de experiencia utilizando escalas como el MOS.
- Objetivamente: utilizando ensayos electrónicos para medir aspectos de la experiencia de descarga como el retardo en la descarga de la página web.
- Indirectamente: utilizando parámetros que miden el desempeño de la red como el throughput y el delay para estimar el impacto en la experiencia del usuario en la descarga de los datos.

Los métodos subjetivos son costosos y consumen mucho tiempo, existen estudios acerca de la relación entre la percepción del usuario y los tiempos de respuesta para gran variedad de aplicaciones:

- Las personas prefieren tiempos de respuesta menores a 1 segundo. (Schneiderman, 1998)
- Los retardos no deben exceder 1 segundo. (Nielsen, 1994)
- Los usuarios toman conciencia de la espera si los retardos de respuesta exceden los 2 segundos. (Gallaway 1981, Miller 1968, Youmans 1983, Williams 1973)

- El número de operaciones productivas cae cuando el tiempo de respuesta del sistema excede los 4 segundos y la caída es dramática luego de los 12 segundos. (Barber y Lucas, 1983)
- Para Web Browsing los usuarios asumen que el sistema se ha caído luego de los 8.5 segundos a menos que tengan un feedback. (Bickford, 1998)
- El delay de respuesta debe ser menor a los 10 segundos para mantener la atención del usuario. (Nielsen, 1994)

Como se puede observar de la descripción anterior, para una gran variedad de aplicaciones y tareas interactivas incluyendo Web Browsing, existe un umbral de valores de delay aceptables por el usuario en el rango de 2 a 4 segundos y un tiempo de entre 8 y 10 segundos luego de los cuales el usuario abandona el intento de descarga.

Existen tres regiones distintas de percepción de los usuarios según los tiempos de respuesta del sistema:

- Experiencia instantánea: el límite de espera dentro del cual el usuario tiene una sensación de que el sistema responde automáticamente es de 0.1 segundo, este límite es importante en servicios conversacionales como Chat.
- Experiencia ininterrumpida: el límite de tiempo para el cual el usuario percibe que el servicio se mantuvo ininterrumpido es 1 segundo, este valor es un límite importante para Web Browsing.
- Experiencia focalizada: el límite para mantener la atención del usuario es de 10 segundos. Para valores de retardo superiores, el usuario deseará realizar otras experiencias mientras espera. Los feedbacks son importantes durante el retardo, sobre todo si estos son variables.

Los distintos retardos que afectan la Calidad de Experiencia para la navegación en la web son:

1. Retardo entre el momento que el usuario ingresa una URL y la indicación de que el sitio web ha sido encontrado.
2. Retardo hasta el momento de la indicación de comienzo de la descarga.
3. Retardo hasta la recepción de suficiente cantidad de datos para que el usuario comience a absorber información.
4. Retardo hasta la recepción de suficiente información para que el usuario comience a poder utilizarla.
5. Retardo de la finalización de la descarga.
6. Porcentaje de cancelaciones de descarga (por ejemplo en relación al tamaño del objeto).
7. Variación en el retardo de respuesta para sesiones interactivas.

Escenario de Simulación

Para desarrollar las ideas planteadas en el proyecto se parte de distintas hipótesis que reflejen el escenario requerido para poder cumplir con los objetivos. Para ello se trabaja dentro de un entorno suburbano donde existe una única radio base abarcando cierta área de cobertura. Los usuarios se encuentran distribuidos uniformemente alrededor de la radio base y de esta forma tendrán diferentes condiciones de radio afectando el tipo de servicio que utilicen.

El conjunto de usuarios conectados al nodo de acceso estarán haciendo uso de servicios de voz, web browsing (navegación web), descarga de archivos mediante el protocolo FTP y también video streaming (video on demand, ver capítulo 3.1). Agrupando estos tráfico en un solo conjunto, se tendrá un mix de servicios que logra producir cierto efecto sobre la red. Cada servicio estará representado por un porcentaje parametrizable el cual el operador de la herramienta puede seleccionar. En la figura 4.1 se refleja el escenario planteado.

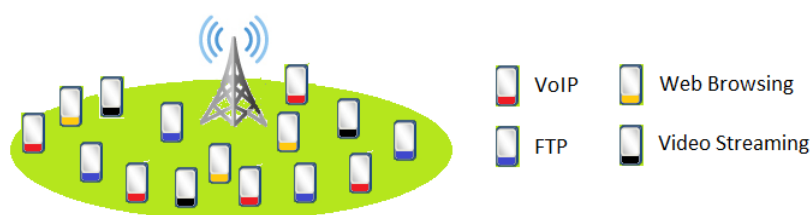


Figura 4.1: Escenario de simulación.

Es importante mencionar que una de las hipótesis considerada es que el estado de la red no es dinámico, los usuarios no presentan movilidad por lo tanto no hay etapas de handover. Existen varios parámetros que deben ser considerados para poder representar este escenario, sobre todo parámetros vinculados a la red como ser frecuencia de operación, elección del scheduler de paquetes, modelo de propagación, entre otros, los cuales se presentan en el siguiente capítulo.

Por último, una vez que se tiene el escenario planteado, se podrá analizar la calidad

de servicio que brinda la red y a su vez estudiar si los requerimientos de calidad de experiencia en el extremo usuario son los deseados. Para poder realizar este desarrollo de eventos es necesario contar con una herramienta que pueda simular una red LTE. Se debe elegir una herramienta que permita configurar y cambiar distintos parámetros de la red para adaptarlo al contexto de trabajo. Un objetivo es generar los diferentes tipos de tráficos explicados anteriormente, siendo éstos, elementos de entrada al simulador de red para un posterior análisis de comportamiento de QoS y de QoE.

4.1. Elección del simulador

Los simuladores juegan un papel fundamental en la validación y verificación de implementaciones de distintas tecnologías, permitiendo evaluar el comportamiento de un sistema de telecomunicaciones en distintos escenarios.

Se distinguen dos tipos de simulaciones, discretas y continuas, de acuerdo al mecanismo de variación de las variables relevantes de estudio. La de tipo discreto es la más utilizada para analizar redes de comunicaciones, y se basa en eventos discretos y estocásticos que representan los cambios en el sistema simulado.

Al analizar un sistema de comunicaciones complejo como LTE, si pretendemos obtener un modelo analítico deberíamos introducir suposiciones altamente restrictivas sobre el comportamiento del sistema, perdiendo de esta forma utilidad. Aquí es donde las técnicas de simulación permiten estudiar el sistema de forma simplificada, siendo en algunos casos la única técnica aplicable. Las técnicas de simulación son imprescindibles para realizar análisis en escenarios de tráfico heterogéneo, con mezcla de distintos tipos de servicios, permitiendo un dimensionamiento a nivel de recursos necesarios para ofrecer la calidad de servicio requerida.

Luego de buscar alternativas de simuladores que estuvieran desarrollados para incorporar redes LTE, se opta por el simulador de eventos discretos NS-3, el cual cuenta con un módulo para redes LTE llamado LENA, que se encuentra actualmente en etapa de desarrollo. Este simulador cuenta con la ventaja de ser código abierto, permitiendo realizar modificaciones y adaptaciones de código en caso de ser necesarias.

4.2. Características de NS3

NS-3 es un simulador de eventos discretos, escrito completamente en C++, con licencia GNU GPLv2. Tiene un núcleo organizado en librerías, cada una de ellas contiene las clases necesarias para simular un protocolo u objeto particular dentro de un sistema.

Para simular una red se crea un script en C++ que define todos los objetos a utilizar, las vinculaciones entre estos y parámetros asociados. También especifica la duración de la simulación y brinda los parámetros de entrada para la generación de números aleatorios.

Existen distintos niveles de APIs en NS3, se puede programar a bajo nivel con un manejo fino de todos los objetos y parámetros del sistema, como también a más alto nivel con una API conformada por Helpers. Estos Helpers son objetos que manejan la configuración de otros objetos, ofreciendo de esta forma una interfaz más amigable a la hora de programar.

4.3. LENA

El significado del nombre LENA es LTE - EPC Network Simulator, es el primer simulador open source para redes LTE , está actualmente en etapa de desarrollo por el Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) y está basado en el simulador de redes NS-3.

El módulo LTE de LENA fue incorporado recientemente al release NS3.15 del simulador NS3, agregando, entre otras capacidades, la posibilidad de poder simular un escenario LTE+EPC en NS3.

Para modelar el sistema LTE con cierto nivel de detalle como para permitir una correcta evaluación de los aspectos anteriormente mencionados, los desarrolladores de LENA tuvieron en cuenta varios requerimientos, a continuación se mencionan algunos de los criterios que se consideraron en el diseño de la herramienta y son significativos para el desarrollo del proyecto:

- En el nivel de radio, la granularidad del modelo debe ser de al menos un Resource Block (RB).
- El simulador es capaz de tener hasta 10 eNBs y centenas de User Equipments en una simulación.
- Es posible configurar distintas celdas en la simulación para que se utilicen distintos anchos de banda y frecuencias portadoras.
- El modelo es utilizado para la transmisión de paquetes IP por las capas superiores, esto se consideró ya que en el scheduling y Radio Resource Management no se manejan paquetes IP directamente pero sí se trabaja con RLC PDUs, los cuales son obtenidos mediante la segmentación y concatenación de paquetes IP, tareas realizadas por las entidades RLC.

En las siguientes figuras se puede observar el stack inferior de protocolos de Radio, para el eNB y UE.

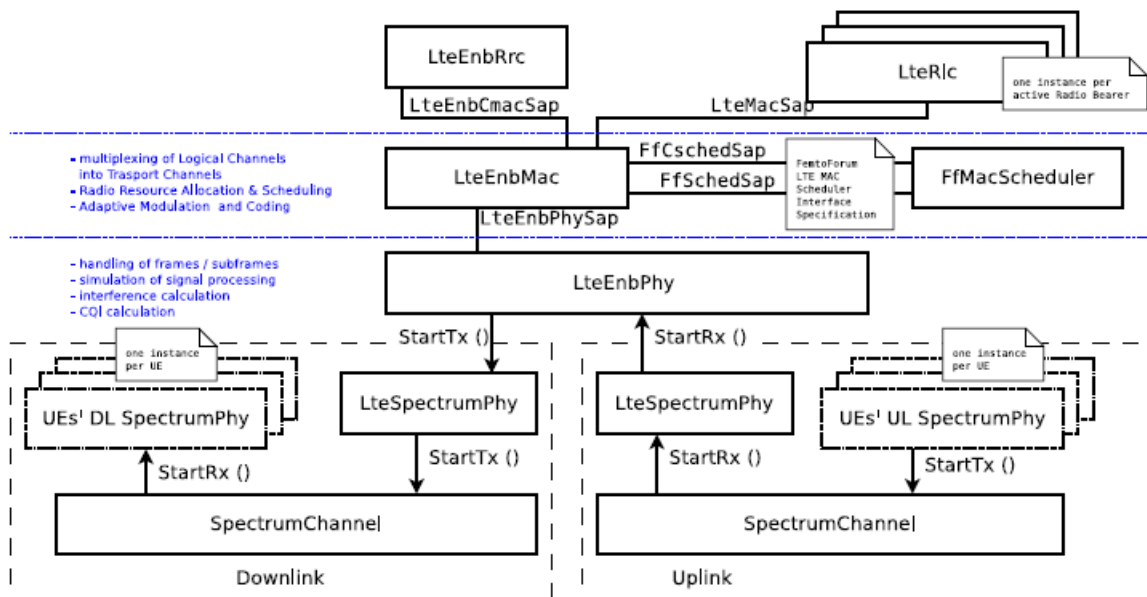


Figura 4.2: Stack inferior de protocolos de Radio del eNB [23].

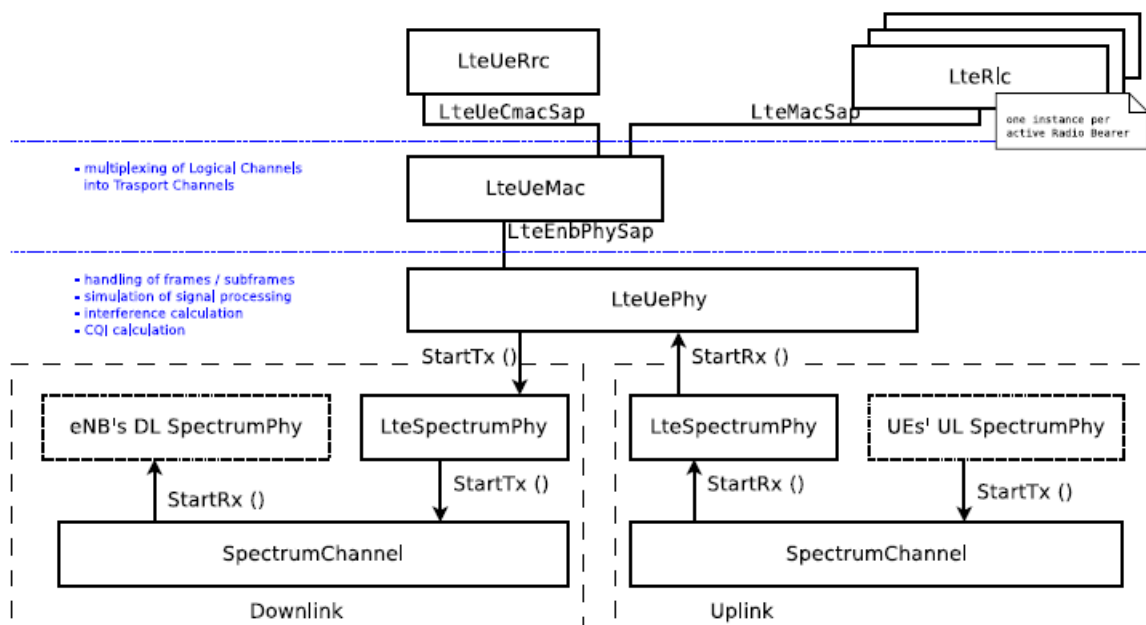


Figura 4.3: Stack inferior de protocolos de Radio del UE [23].

El modelo de stack de protocolos inferior de radio incluye la capa PHY y MAC, además del scheduler, el cual es comúnmente asociado a la capa MAC. La diferencia más

importante entre el eNB y el UE es la presencia del Scheduler en el eNB, el cual , como ya se explicó en la sección 2.5 , tiene como tarea la asignación de recursos de radio a los UE y Radio Bearers en Uplink y Downlink. Este componente no está presente en el UE.

La segunda parte del stack de protocolos de radio está representado en la siguiente figura:

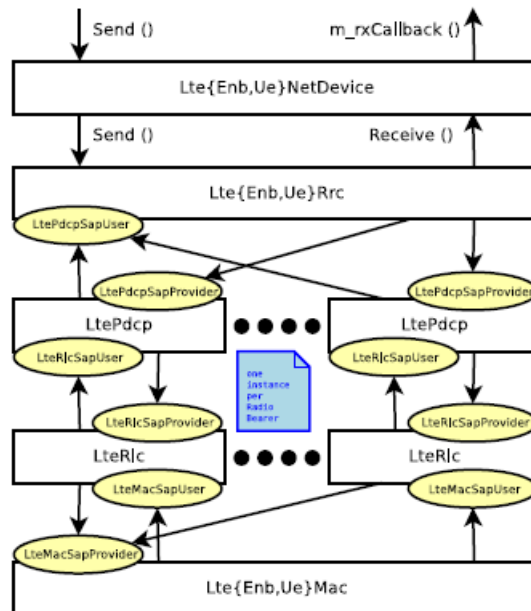


Figura 4.4: Stack superior de protocolos de radio [23].

Esta parte incluye los protocolos RRC, PDCP y RLC. La arquitectura es muy similar entre el eNB y el UE, en ambos casos hay una instancia MAC y una RRC las cuales trabajan en pares de RLC y PDCP (hay una instancia de RLC y una de PDCP por cada radio bearer). En la versión actual del simulador, el plano de datos del stack de protocolos superior fue modelado con precisión, en particular los protocolos RLC y PDCP son implementados con los encabezados especificados por la 3GPP. Por otro lado, la función del plano de control (la cual involucra principalmente a la capa RRC), fue modelada en forma simplificada.

Modelo Evolved Packet Core:

El modelo de EPC proporciona medios para simular la conectividad IP extremo a extremo en un sistema LTE. En particular, soporta la conexión de múltiples UE a Internet a través del acceso a radio de múltiples eNB conectados a un único nodo SGW/PDN-GW.

Los criterios de diseño más importantes que los desarrolladores del simulador siguieron para la implementación del modelo de EPC son:

- El único tipo de red soportada de Packet Data Network (PDN) es IPv4.
- La funcionalidad del SGW y PGW son implementadas en un único nodo.

- Es posible utilizar el modelo EPC con cualquier aplicación regular del simulador ns3 que utilice TCP o UDP.
- Es posible simular topologías de red con varios eNBs, por lo cual los protocolos del plano de datos entre eNB y el SGW/PGW fue modelado apropiadamente.
- Es posible para un UE utilizar diferentes aplicaciones con distintos perfiles de QoS. Para esto, los UE soportan múltiples EPS bearers. Esto incluye la clasificación necesaria del tráfico TCP/UDP sobre IP realizado en el UE para Uplink y en el PDN-GW para Downlink.
- Se focalizó en el plano de datos del modelo de EPC y en simulaciones con usuarios activos en modo conectado, no se considera el modo idle.

La siguiente figura representa el stack de protocolos de LTE-EPC extremo a extremo. La mayor simplificación es la ya mencionada inclusión del PDN-GW y SGW en el mismo nodo, lo cual evita la necesidad de utilizar las interfaces S5 y S8 especificadas por la 3GPP. Por otro lado, para el stack de protocolos de la interfaz S1-U y el stack de radio, todas las capas especificadas por la 3GPP están presentes.

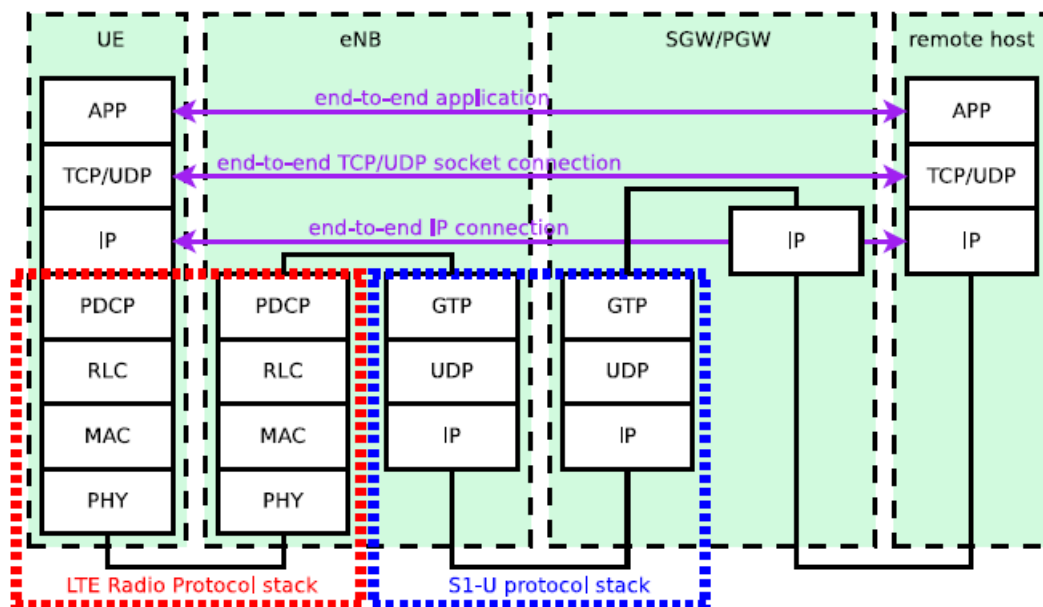


Figura 4.5: Stack de protocolos del plano de datos LTE-EPC [23].

Como se muestra en la figura 4.5, hay dos capas IP distintas en la interconexión. La primera es la capa extremo a extremo la cual provee conectividad a los usuarios, esta capa involucra a los UE, PGW y el remote host pero no involucra al eNB. Por defecto, los UEs son asignados con una Ipv4 pública en la red 7.0.0.0/8 y el PDN-GW toma la dirección 7.0.0.1, la cual es utilizada por todos los UEs para alcanzar Internet.

La segunda capa IP es la red de área local EPC, la cual involucra todos los eNB y al SGW/PDN-GW. Esta red es implementada como un conjunto de enlaces punto a punto los cuales conectan cada eNB con el SGW/PDN-GW; debido a esto, el SGW/PDN-GW

tiene un conjunto de dispositivos punto a punto, cada dispositivo provee conectividad a los diferentes eNB. Por defecto, una sub red de IP 10.x.y.z/30 es asignada a cada enlace punto a punto. Tal como especifica la 3GPP, la comunicación IP extremo a extremo es “canalizada” a través de la red IP local EPC utilizando los protocolos GTP/UDP/IP.

En Downlink, los paquetes Ipv4 son generados por un servidor remoto (remote host) y direccionados a uno de los dispositivos, UE. El ruteo de Internet entregará los paquetes al dispositivo genérico SGW/PDN-GW el cual está conectado a Internet a través de la interfaz Gi. El SGW/PDN-GW tiene un dispositivo VirtualNetDevice el cual tiene asignado la dirección IP del gateway en la subred del UE; las reglas de ruteo estático harán que el paquete proveniente de Internet sea ruteado a través de este dispositivo virtual. Este dispositivo comienza el procedimiento de “canalización” GTP/UDP/IP, entregando el paquete a una aplicación dedicada a esto, llamada EpcSgwPgwApplication en el nodo SGW/PDN-GW, esta aplicación realiza las siguientes operaciones:

- Determina el nodo eNB al cual está asociado el UE , mirando la dirección IP de destino (dirección UE).
- Clasifica el paquete utilizando Traffic Flow Templates (TFTs) para identificar a que EPS Bearer pertenece. Las EPS bearers tienen un mapeo uno a uno con las Bearers de la interfaz S1-U, por lo cual esta operación retorna el identificador del túnel GTP-U , Tunnel Endpoint Identifier (TEID) al cual pertenece el paquete.
- Agrega el encabezado correspondiente del protocolo GTP-U al paquete.
- Finalmente envía los paquetes a través de un puerto UDP al dispositivo de red punto a punto de la interfaz S1-U, direccionado al eNB al cual está registrado el UE.

Como consecuencia, el paquete IP con los nuevos encabezados IP, UDP y GTP es enviado a través de un enlace S1 al eNB, donde es recibido y entregado localmente (debido a que la dirección IP de destino se corresponde con la dirección IP del eNB). El proceso de envío local enviará el paquete a través de un puerto UDP, a una capa de aplicación llamada EpcEnbApplication. Esta aplicación realiza las siguientes operaciones:

- Remueve el encabezado GTP y recupera el TEID contenido en él.
- Basado en el mapeo que existe entre las portadoras pertenecientes a la interfaz S1-U y las portadoras de radio (requerimiento de la 3GPP), determina la identificación de la portadora de radio, (Radio Bearer ID-RBID) al cual pertenece el paquete.
- Registra el valor del RBID en una etiqueta llamada LteRadioBearerTag, la cual es agregada al paquete.
- Envía el paquete al LteEnbNetDevice del nodo eNB a través del raw packet socket.

En este punto el encabezado superior del paquete es el encabezado IP de extremo a extremo dado que los encabezados IP/UDP/GTP ya han sido extraídos. Tras la recepción del paquete desde la aplicación EpcEnbApplication, el LteEnbNetDevice recupera el RBID del LteRadioBearerTag y basado en el RBID determinará la portadora de radio (junto a sus correspondientes instancias de protocolos PDCP y RLC) la cual luego es utilizada para enviar el paquete al UE a través de la interfaz de radio.

Finalmente, el `LteUeNetDevice` del UE recibirá los paquetes y los entregará localmente al stack de protocolos IP, el cual enviará el paquete a la aplicación del UE, punto final en la comunicación de Downlink.

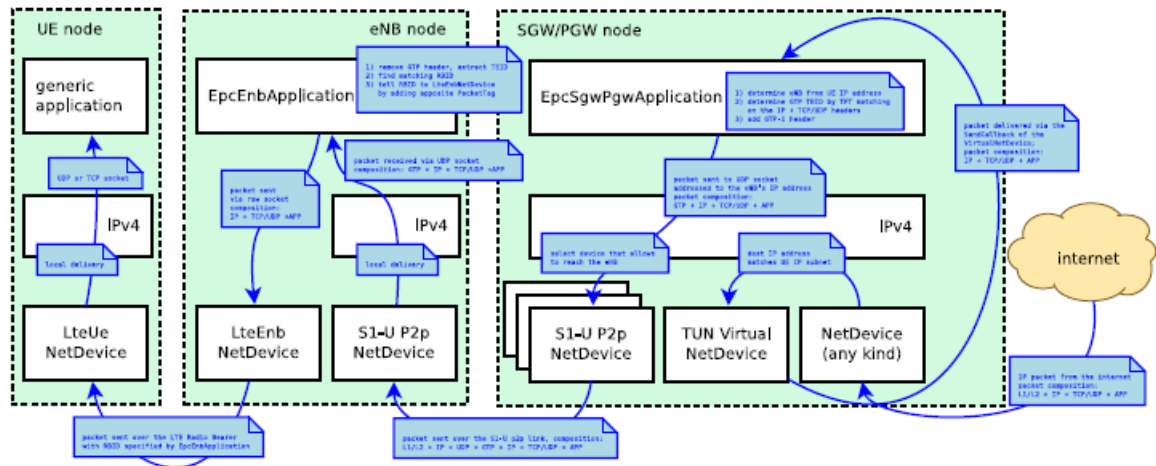


Figura 4.6: Flujo de datos en Downlink entre Internet y el UE [23].

En Uplink, los paquetes IP son generados por una aplicación genérica dentro del UE y enviados por el stack local TCP/IP al `LteUeNetDevice` del UE. El `LteUeNetDevice` realiza las siguientes operaciones:

- Clasifica el paquete utilizando TFTs y determina el Radio Bearer al cual pertenece el paquete (y su correspondiente RBID).
- Identifica la correspondiente instancia del protocolo PDCP, el cual es el punto de entrada del stack de protocolos de Radio para este paquete.
- Envía el paquete al eNB a través del stack de protocolo de Radio de LTE.

El eNB recibe el paquete a través de su `LteEnbNetDevice`. Dado que hay una única instancia de los protocolos PDCP y RLC para cada Radio Bearer, el `LteEnbNetDevice` es capaz de determinar el RBID del paquete. El valor del RBID es luego grabado en un `LteRadioBearerTag`, el cual es agregado al paquete. Luego, el `LteEnbNetDevice` reenvía el paquete al `EpcEnbApplication` a través de un socket de paquetes.

Luego de recibido el paquete, el `EpcEnbApplication` realiza las siguientes operaciones:

- Recupera el RBID del `LteRadioBearerTag` en el paquete.
- Basado en el mapeo que existe entre las portadoras S1-U y las portadoras de radio, determina la correspondiente instancia EPS Bearer y GTP-U TEID.
- Agrega el encabezado GTP-U en el paquete, incluyendo el TEID determinado anteriormente.
- Envía el paquete al SGW/PDN-GW a través del puerto UDP, conectado al dispositivo punto a punto, interfaz S1-U.

En este punto, el paquete contiene los encabezados S1-U IP, UDP y GTP en adición al encabezado IP extremo a extremo original. Cuando el paquete es recibido por el correspondiente NetDevice del SGW/PDN-GW es entregado localmente (debido a que la dirección IP de destino del encabezado IP se corresponde con la dirección IP del punto a punto net device). El proceso de entrega local enviará el paquete al EpcSgwPgwApplication a través del puerto UDP. Luego, la EpcSgwPgwApplication remueve el encabezado GTP y envía el paquete al VirtualNetDevice. En este punto, el encabezado del paquete es un encabezado IP, por lo cual si la dirección IP de destino que posee el encabezado es un servidor remoto en Internet, el paquete será enviado a través del correspondiente NetDevice del SGW/PDN-GW. En el caso de que el paquete sea direccionado hacia otro UE, el stack IP del SGW/PDN-GW re direccionará el paquete nuevamente hacia el VirtualNetDevice y el paquete irá a través del proceso de entrega de Downlink para alcanzar el UE de destino.

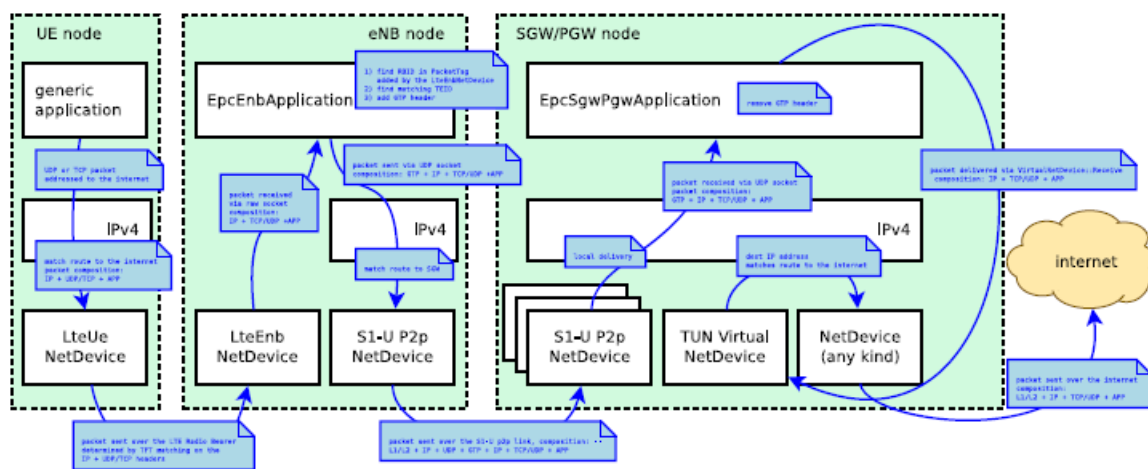


Figura 4.7: Flujo de datos en Uplink entre el UE e Internet [23].

Modelo de Red LTE

Para modelar una red LTE se debe tener en cuenta dos componentes, el acceso y el núcleo de la red. En el simulador se puede trabajar con dos modelos de red distintos, uno que abarca solo la parte de acceso a la red y otra que contiene el acceso y el núcleo de la red.

La arquitectura de red elegida es la que se presenta en la figura 5.1. La misma está compuesta por dos componentes:

- Modelo LTE: este modelo incluye el LTE Radio Protocol stack, capas RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY. Son protocolos que vinculan a los UE con el eNB.
- Modelo EPC: este modelo incluye las interfases del núcleo de la red junto con sus protocolos. Es donde se encuentra el SGW, PGW y MME y sus vínculos con el eNB.

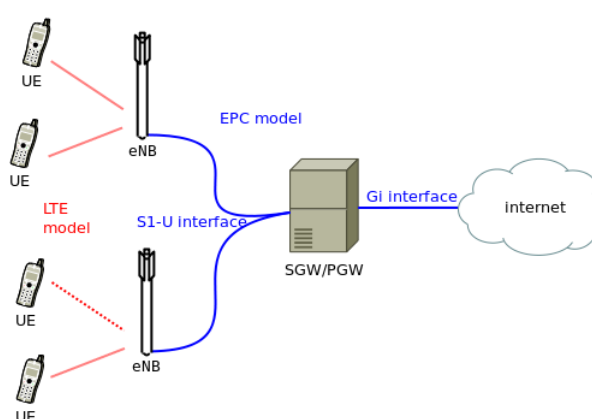


Figura 5.1: Arquitectura de la Red [16].

Teniendo en cuenta las hipótesis realizadas en el proyecto, la red está compuesta por una sola radio base la cual brinda cobertura a un número determinado de usuarios que se encuentran distribuidos uniformemente alrededor de la misma. Para poder simular este

escenario se deben configurar distintas variables del simulador que se explicarán a continuación y tomar decisiones sobre los modelos de antenas y propagación que se utilizan.

5.1. Modelo de propagación

Existen distintos modelos de propagación que se pueden utilizar para los diferentes escenarios que hay en una red de comunicación. Una de las hipótesis consideradas en el proyecto es que la ubicación de la radio base está en un entorno suburbano con una determinada densidad de población. En este entorno no existen grandes estructuras que afecten la propagación de las señales, la geografía del lugar es una geografía llana sin obstáculos que produzcan interferencias, como pueden ser montes o cerros que degradan la señal.

Tomando en cuenta todas estas hipótesis se decidió trabajar en tres modelos de propagación analizando sus características para luego decidir sobre cual desarrollar las simulaciones. Se analizó el modelo de espacio libre conocido como el modelo de Friis; el modelo de Friis modificado y el modelo Cost231.

El modelo de Friis permite relacionar la potencia recibida con la potencia transmitida para dos antenas que estén en las condiciones de campo lejano. Se considera zona de campo lejano cuando la distancia entre las dos antenas R , cumple

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}$$

donde D es la dimensión máxima de cualquiera de las antenas y λ es la longitud de onda para la frecuencia de trabajo.

La ecuación de Friis es la siguiente:

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} \cdot e_{cdr} (1 - |\Gamma_t|^2) (1 - |\Gamma_r|^2) \cdot \frac{(\lambda)^2}{(4\pi R)^2} \cdot D_t(\theta_t, \phi_t) \cdot D_r(\theta_r, \phi_r) \cdot (|\rho_t \cdot \rho_r|)^2$$

Donde:

- Γ_t y Γ_r son los coeficientes de reflexión del sistema transmisor y del sistema receptor respectivamente.
- $(1 - |\Gamma_t|^2)$ representa la razón de potencia que la antena transmisora puede radiar debido a los desacoples existentes en el sistema transmisor (reflexiones) y $(1 - |\Gamma_r|^2)$ representa la razón de potencia que el circuito receptor puede realmente tomar debido a los desacoples existentes en el sistema receptor.
- e_{cdt} y e_{cdr} son factores que tienen en cuenta las pérdidas de conducción y dieléctrica en transmisión y en recepción respectivamente.
- $|\rho_t \cdot \rho_r|^2$ este factor tiene en cuenta las pérdidas por desadaptaciones en la polarización.
- $\frac{(\lambda)^2}{(4\pi R)^2}$ se lo conoce como “free-space loss factor” (factor de pérdida de espacio libre).

El segundo modelo utilizado es el modelo de Friis modificado, el cual es llamado de esta forma debido a que el “free space factor” es modificado. Existe un parámetro gamma que afecta la distancia, este valor puede variar de 2 a 5 dependiendo del entorno en el que se trabaje. Bajo las hipótesis realizadas de entorno suburbano el valor de gamma correspondiente es 2.7.

El termino de la ecuación de Friis modificado es:

$$\frac{(\lambda)^2}{(4\pi)^2} \cdot (1/R)^\gamma$$

Por último se trabaja en el modelo de propagación Cost231, modelo desarrollado por la Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica que extiende las frecuencias utilizadas en el modelo de Okumura-Hata en el rango de los 1500MHz a 2000MHz. Este modelo es utilizado en redes móviles y no considera espacio libre sino que refleja las pérdidas existentes en áreas urbanas y suburbanas. Como se mencionó anteriormente se basa en el modelo de Okumura-Hata el cual fue desarrollado en 1968 para predecir el valor medio de la pérdida de camino en la ciudad de Tokio basándose en curvas que fueron creadas por los autores. Estas curvas reflejan las pérdidas de camino según la frecuencia de operación de la radio base y la distancia del móvil a la radio base. Los autores del modelo plantearon una expresión analítica de las curvas según el entorno en el que se encuentre el móvil y surge así el modelo Cost231 el cual sirve para un rango de frecuencias mayores.

Las pérdidas que este modelo introduce se muestran en la siguiente ecuación:

$$L_{Cost}(dB) = 46,3 + 33,9 \cdot \log(f) - 13,82 \log(h_{bs}) - a(h_{ue}) + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{bs})) \cdot \log(d)$$

donde:

$$a(h_{ue}) = (1,1 \cdot \log(f) - 0,7) \cdot h_{ue} - (1,56 \cdot \log(f) - 0,8)$$

y h_{bs} y h_{ue} son las alturas de la radio base y el User Equipment respectivamente.

5.2. Modelo de Antenas

Como se vio anteriormente, los usuarios están distribuidos uniformemente alrededor de la radio base por lo que se toma una antena isotrópica para el eNB para poder cubrir todas las direcciones posibles. No se eligió una antena direccional porque no se adapta a las hipótesis realizadas debido a que el patrón de radiación de una antena de este tipo concentra su radiación en un área específica pudiendo dejar a usuarios fuera de esa cobertura. Se trabajó con una potencia en el transmisor del eNB de $P_t = 47dBm$, el valor de esta potencia es la más frecuente en los transmisores de radio bases LTE.

Las antenas configuradas en los UE son también antenas isotrópicas simulando la realidad y se eligió una potencia máxima de salida de $P_{UEt} = 23dBm$, potencia establecida para un UE, clase 3, tomada de la 3GPP 36.101, sección 6 [20].

5.3. Servicio portador EPS Bearer

En la sección 3.2 se vio que en toda conexión PDN es necesaria la existencia de un servicio portador EPS donde se envía el tráfico IP del usuario, este servicio portador EPS depende del servicio que utilice el usuario, por lo que se debió evaluar cual es la mejor portadora de EPS para los distintos usuarios.

La figura presentada en la sección 3.2.1, figura 3.2 junto con la recomendación de la 3GPP 23.203 sección 6.1.7.2 permitió analizar que portadora EPS elegir según el servicio demandado por el usuario. Una vez elegida la portadora EPS se lo vinculó con los parámetros del simulador que representan dichas características.

Para el servicio de voz se eligió la portadora EPS “GBR CONV VOICE” la cual tiene prioridad 2, retardo de paquetes de 100ms y una tasa de error de paquetes de 10^{-2} ; [17]. Como el nombre lo indica este servicio portador EPS es de tasa garantizada.

Para los servicios de tráfico web y de FTP se eligió la portadora EPS “NGBR VIDEO TCP DEFAULT” la cual tiene prioridad 9, retardo de paquetes de 300ms y una tasa de error de paquetes de 10^{-6} . Este servicio portador EPS no tiene una tasa garantizada y es el indicado por la 3GPP para servicios de: www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc [17].

Por último, el servicio de Video Streaming fue representado por el servicio portador EPS “NGBR VOICE VIDEO GAMING” el cual tiene prioridad 7, retardo de paquetes de 100ms y una tasa de error de paquetes de 10^{-3} . Es un servicio portador sin tasa garantizada y es el indicado por la 3GPP para servicios de Video Streaming [17].

5.4. Ancho de Banda

En redes LTE la elección del ancho de banda puede variar desde los 1.4 MHz hasta los 20MHz. Dependiendo de la elección del ancho de banda, se establecen cuántos bloques de recursos físicos (PRB, Physical Resource BLock) son necesarios utilizar. Un bloque de recurso físico es el elemento mínimo de información que es asignado a un UE por el eNB. El PRB tiene un ancho de banda de 180KHz formado por 12 subportadoras equiespaciadas 15KHz y tiene una duración de 0.5 ms.

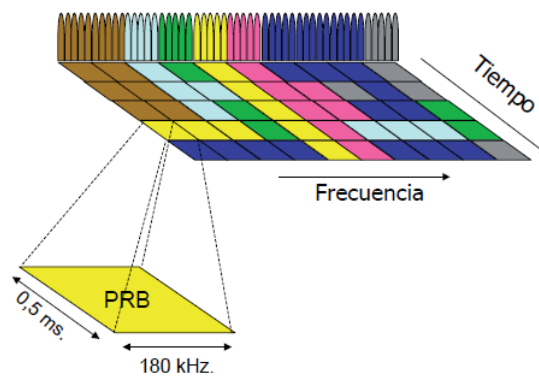


Figura 5.2: Estructura del PRB [5].

La figura 5.3 indica la cantidad de PRB que son asignados para los distintos anchos de banda posibles. Por ejemplo, en las simulaciones donde se trabaja con un ancho de banda de 20MHz, es decir 100 bloques de recursos físicos, se los utiliza tanto para el Downlink como para el Uplink. Esto es debido a que las técnicas de transmisión son similares tanto para el Downlink como para el Uplink. En el Uplink las subportadoras también están separadas a 15KHz agrupadas en grupos de 12.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

Figura 5.3: Estructura del PRB [5].

Es importante mencionar que el número de subportadoras es 12 veces la cantidad de los PRB más una portadora, debido a que la portadora central de la banda no envía información. Esta frecuencia es la encargada de los sincronismos en frecuencia del receptor y también es una ayuda para los sistemas de ajustes entre el transmisor y el receptor.

5.5. Frecuencia de la Portadora y EARFCN

A nivel de capa física en un sistema LTE se puede utilizar dos técnicas distintas de acceso múltiple según el sentido de la transmisión (Uplink o Downlink). Para el sentido descendente se utiliza OFDMA mientras que en el sentido ascendente se utiliza SC-FDMA . Como se explicó anteriormente la separación entre las subportadoras es de 15 kHz para ambos casos y la cantidad de subportadoras depende del ancho de banda que se utilice.

La figura 5.4 muestra los datos para los distintos anchos de banda.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Figura 5.4: Tabla de Datos de subportadoras para los distintos anchos de banda. [5].

En la recomendación de la 3GPP 36.101 sección 5.7.3 se definen 40 bandas de operación para la capa física de LTE trabajando en modo duplexión por división de frecuencia, FDD, o en duplexión por división de tiempo, TDD. La frecuencia de la portadora de un canal en Downlink y Uplink están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$F_{DL} = F_{DL-low} + 0,1(N_{DL} - N_{offs-DL})$$

$$F_{UL} = F_{UL-low} + 0,1(N_{UL} - N_{offs-UL})$$

El valor N_{DL} y N_{UL} se corresponde con los llamados EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number) para el sentido Downlink y Uplink y los valores $N_{offs-DL}$ y $N_{offs-UL}$ representan el offset existente en dichos sentidos, los cuales dependen de la banda en la que se opere. Por último los valores F_{DL-low} y F_{UL-low} se corresponden con las frecuencia inferiores en cada dirección (Downlink y Uplink).

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F_{DL-low} (MHz)	$N_{offs-DL}$	Range of N_{DL}	F_{UL-low} (MHz)	$N_{offs-UL}$	Range of N_{UL}
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799
9	1844.9	3800	3800 – 4149	1749.9	21800	21800 – 22149
10	2110	4150	4150 – 4749	1710	22150	22150 – 22749
11	1475.9	4750	4750 – 4949	1427.9	22750	22750 – 22949
12	728	5000	5000 – 5179	698	23000	23000 – 23179
13	746	5180	5180 – 5279	777	23180	23180 – 23279
14	758	5280	5280 – 5379	788	23280	23280 – 23379
...						
17	734	5730	5730 – 5849	704	23730	23730 – 23849
...						
33	1900	36000	36000 – 36199	1900	36000	36000 – 36199
34	2010	36200	36200 – 36349	2010	36200	36200 – 36349
35	1850	36350	36350 – 36949	1850	36350	36350 – 36949
36	1930	36950	36950 – 37549	1930	36950	36950 – 37549
37	1910	37550	37550 – 37749	1910	37550	37550 – 37749
38	2570	37750	37750 – 38249	2570	37750	37750 – 38249
39	1880	38250	38250-38649	1880	38250	38250-38649
40	2300	38650	38650-39649	2300	38650	38650-39649
NOTE: The channel numbers that designate carrier frequencies so close to the operating band edges that the carrier extends beyond the operating band edge shall not be used. This implies that the first 7, 15, 25, 50, 75 and 100 channel numbers at the lower operating band edge and the last 6, 14, 24, 49, 74 and 99 channel numbers at the upper operating band edge shall not be used for channel bandwidths of 1.4, 3, 5, 10, 15 and 20 MHz respectively.						

Figura 5.5: Tabla de canales E-UTRA. [18].

Otro dato a tener en consideración es la banda de operación, en la figura 5.6 se muestran las distintas frecuencias de operación para las diferentes bandas.

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL, low}$	$- F_{UL, high}$	$F_{DL, low}$	$- F_{DL, high}$	
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	- 849 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	1749.9 MHz	- 1784.9 MHz	1844.9 MHz	- 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	- 1770 MHz	2110 MHz	- 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	- 1447.9 MHz	1475.9 MHz	- 1495.9 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

Figura 5.6: Banda de operación E-UTRA. [19].

5.6. Schedulers

En la sección 2.5 se analizaron las distintas funciones del scheduler y la importancia del mismo para poder asignar de manera dinámica los recursos de radio a los usuarios para que puedan realizar la correcta transmisión de datos. Existen distintos modelos de scheduling de paquetes que son implementados en redes LTE, estos modelos permiten definir estrategias para decidir en cada PRB y en cada subtrama, el usuario que debe realizar la transmisión. El simulador permite trabajar con dos tipos de schedulers. A continuación se presenta el análisis de estos algoritmos de scheduling de paquetes.

• Round Robin Scheduler

Este modelo de scheduler asigna el canal a los distintos usuarios sin tener en consideración las condiciones de canal de radio. Es una estrategia de igualdad para todos los usuarios, debido a que todos los usuarios tienen destinado el uso de los recursos de radio disponibles durante un mismo período de tiempo. La principal desventaja es que al no tener en cuenta las condiciones de radio, los usuarios que estén en malas condiciones de radio, no podrán usar el canal por más tiempo para poder tener la misma calidad de servicio de aquellos usuarios que tienen una buena condición de radio. Tomando estas consideraciones, el scheduler divide los recursos disponibles entre los distintos flujos activos. En caso de que el número de RBGs (Resource Block Groups, grupos de Resource Blocks) sea mayor al número de flujos activos, todos los flujos pueden ser colocados dentro de la misma subtrama. En caso contrario, si el número de flujos activos es mayor al número de RBGs, no todos los flujos serán colocados en la misma subtrama sino que en la subtrama siguiente se colocarán los flujos que estaban en cola. Por otra parte, los esquemas de codificación y modulación que el Round Robin Scheduler utiliza para cada usuario, dependen de la información recibida en los CQI.

- **Proportional Fair Scheduler**

Este tipo de scheduler tiene como objetivo utilizar la capacidad máxima del canal de radio y al mismo tiempo poder brindar a todos los usuarios un grado mínimo de servicio, realizando un reparto justo de los recursos entre los distintos usuarios. Se tiene en cuenta las condiciones de canal del usuario, permitiendo el uso de los recursos de radio por más tiempo a los usuarios más perjudicados. Como contrapartida se afecta a los usuarios en mejores condiciones de radio para permitir a todos los usuarios una buena percepción del servicio.

5.7. Técnicas MIMO

En la sección 2.3.2 del capítulo 2 se mencionaron los aspectos generales de la tecnología MIMO.

El simulador implementa tres de los siete modos de transmisión presentes en la norma [22] para el canal de Downlink en LTE. Todos los UE son configurados con un modo de transmisión para ayudar a determinar como se realizará el proceso de transmisión de datos en el canal Physical Downlink Shared Channel. El modo de transmisión asignado al User Equipment es informado en un mensaje de la capa RRC.

Los tres modos de transmisión implementados en el simulador para el canal de Downlink son:

- **Modo de transmisión 1: SISO (Single Input, Single Output).**
Este modo de transmisión refiere a un único puerto de antena, este caso es análogo a la mayoría de los sistemas inalámbricos donde un único flujo de datos es transmitido en una antena y es recibido también por una única antena.
- **Modo de transmisión 2: MIMO Tx Diversity.**
Este modo implica la transmisión del mismo flujo de información a través de dos antenas, el flujo de información es codificado de forma distinta en cada antena. Este tipo de transmisión no incrementa la velocidad de transmisión de datos, pero permite que la señal sea más robusta y debido a esto se necesita menos Relación Señal a Ruido para decodificar la señal.
- **Modo de transmisión 3: MIMO Spatial Multiplexity Open Loop.**
En este caso se transmiten dos flujos de información a través de dos antenas, debido a esto, la multiplexación espacial permite obtener valores de throughput más altos que los obtenidos con la transmisión por diversidad. Este modo de transmisión es uno de los modos principales que permite utilizar LTE.

Para realizar las simulaciones se configuró el modo de transmisión en 3, ya que de esta forma es posible obtener valores superiores de throughput tal como se mencionó anteriormente.

Es importante destacar que en el canal de Uplink sólo se permite la configuración Single Input Single Output (SISO).

Análisis del simulador

Una vez seleccionado el simulador y el modelo de red planteado en el capítulo anterior, se realiza el análisis del simulador. Esta etapa es muy importante ya que permite confiar en la herramienta utilizada y a su vez verificar que cumple con las especificaciones de velocidad de datos dadas por la 3GPP [25].

Para poder hacer el análisis del simulador se creó un escenario de simulación mediante un script en C++, “.análisis.cc”, donde se genera tráfico para poder analizar valores de throughput y compararlos con los que la tecnología LTE brinda. En este escenario se ubica a un único usuario alrededor del eNB generando cierto tipo de tráfico y a medida que el mismo se aleja del eNB se analiza las características del tráfico cursado.

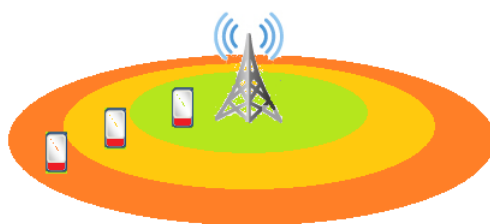


Figura 6.1: Esquema de ubicación del Ue.

6.1. Escenario de simulación para realizar el análisis

En la siguiente sección se explica como es el escenario creado para poder realizar el análisis del simulador. Para llevar a cabo esta etapa se trabaja en dos partes separadas, la configuración de la red y la generación de tráfico.

Para comenzar se explica la configuración de la red, la cual tiene una única radio base, con una antena isotrópica para radiar energía en todas la direcciones, trabajando con

un ancho de banda de 20MHz en la banda de operación 4 AWS según 3GPP, banda utilizada en Uruguay. Al utilizar esta banda las frecuencias de operación configuradas son 2110MHz para Downlink y 1710MHz para Uplink; ver figura 5.6.

La potencia de los transmisores de la radio base y del móvil fueron configuradas en 47 dBm y 23 dBm respectivamente como se explica en la sección 5.2.

De los dos modelos de scheduling de paquetes presentados en la sección 5.6 se opta por trabajar con el Proportional Fair Scheduler dado que es el que realiza un reparto justo de los recursos entre los usuarios para poder brindar cierto grado de servicio. Aunque las simulaciones son realizadas con un único usuario donde el scheduler no interviene en la repartición de los recursos disponibles, al tener esta configuración se puede agregar más usuarios en casos de prueba diferentes y asegurar que todos los que están en el radio de cobertura puedan tener un grado de servicio sin importar significativamente las condiciones de radio.

La técnica MIMO utilizada para este caso es 2x2 configurada en el modo de transmisión 3, visto en la sección 5.7.

Se implementan en el programa los tres modelos de propagación vistos en la sección 5.1 y se toma como parámetro de entrada la elección de uno de ellos permitiendo analizar los distintos comportamientos de la red en función del entorno simulado.

Al tener la red configurada se procede a registrar al usuario en el eNB y se toma como parámetro de entrada la distancia del UE al eNB para luego obtener las pérdidas de camino existentes para el modelo de propagación elegido. Luego, se contrasta el desempeño de la red modificando el modelo de propagación utilizado para poder estimar el radio de cobertura de la radio base.

Dado que el flujo de paquetes existente, es realizado entre el UE y un servidor conectado al P-GW, es necesario configurar el simulador en el modo EPC para poder simular la comunicación IP extremo a extremo. La comunicación entre el P-GW y el servidor es a través de un enlace peer-to-peer con tamaño de MTU de 1500 Bytes y un flujo de datos mucho mayor a los límites teóricos establecidos para la tecnología en cuestión. Estos valores fueron elegidos de esta manera para que el enlace no fuera un punto crítico en la red y la transmisión no se vea limitada en esta instancia. A su vez fue necesario la asignación de direcciones IP para los distintos equipos, siendo las subredes involucradas 1.0.0.0/8 para servidores y la 7.0.0.0/8 para los UE; cabe destacar que en el escenario planteado utilizamos sólo uno de ellos, pero se plantea la posibilidad de incrementar estas cantidades.

Con respecto al tráfico generado se utiliza una fuente de tráfico basada en el protocolo de transporte UDP de 200Mbps, tanto para Downlink (desde el servidor al UE) como para Uplink (desde el UE al servidor). Para lograr la fuente de tráfico en el UE y en el servidor se trabaja con una aplicación ON-OFF, la misma considera períodos de actividad, durante el cual ocurre la transferencia de datos (período ON) seguido de períodos de inactividad(período OFF). Esta aplicación se explica en detalle en el capítulo 7 para el caso del modelo de tráfico utilizado para VoIP. Se configura la aplicación para que la misma envíe paquetes de tamaño 512 Bytes a una velocidad de transmisión de 200

Mbps durante el período ON, tiempo determinado por la duración de la simulación. El período OFF no es configurado ya que no se necesitan tiempos de inactividad; el envío de paquetes es constante. Se instala la aplicación en el UE para simular la comunicación en sentido Uplink y también en el servidor para el caso de Downlink. Por otra parte, en ambos nodos se instala la aplicación PacketSink la cual recibe y consume los paquetes enviados para simular el uso de la información transmitida.

Al tener configurada la red y las fuentes de tráfico en ambos nodos, se simula el escenario planteado para poder medir el throughput obtenido. Es importante notar que el throughput se mide a nivel IP, por un lado se analiza la situación cuando el móvil genera tráfico a 200Mbps hacia el servidor conectado a la red LTE a través del SGW / PDN-GW y se mide la velocidad con la que el tráfico llega al servidor. A su vez se analiza la situación en el que el servidor genera tráfico hacia el UE a una tasa de 200Mbps y se mide la velocidad de datos que llega en el móvil del usuario.

Es importante mencionar que se detectó un error en la implementación del simulador para crear el escenario planteado cuando se trabaja con el modelo de propagación de Friis lo cual debió modificarse obteniendo así una mejora en los resultados. Cuando se configuran las frecuencias de DL y UL según la banda de operación elegida por la norma 3GPP 36.104, la herramienta no lo realiza de una manera correcta, ya que para ambos sentidos toma una única frecuencia siendo afectado la pérdida de camino para el modelo de propagación que se utilice. Por lo tanto se debió trabajar sobre la clase lte-helper para poder configurar correctamente las frecuencias en ambos sentidos y obtener una pérdida de camino acorde a la banda de frecuencias en la que se opera.

A continuación se muestran las distintas simulaciones realizadas para tres modelos de propagación. Se comienza con el modelo de propagación de espacio libre consiguiendo throughput alto en Downlink a distancias por encima de los 100km. Por lo tanto se procedió a considerar un modelo de espacio libre modificado por un parámetro gamma, el cual provoca un decaimiento exponencial según la distancia. En este caso el valor de gamma elegido es 2.7 dado que este valor es el recomendado cuando se simula un entorno sub-urbano. Para culminar se simula con el modelo de propagación COST231, este modelo es una extensión del modelo de Okumura Hata para frecuencias de trabajo mayores actuando en el rango de frecuencias de los 1500MHz a 2000MHz.

Configuración de la red

- **Ancho de banda utilizado:** 20MHz; en la banda 4 (AWS) de operación según la norma 3GPP 36.104.
- **Scheduler:** Proportional Fair
- **Frecuencia de Downlink:** 2110MHz
- **Frecuencia de Uplink:** 1710MHz
- **Potencia de la radio base:** 47dBm
- **Ganancia antena de radio base:** 18dBi

- **Potencia del UE:** 23dBm
- **Técnica MIMO:** Downlink: 2x2 (Modo de transmisión 3 según 3GPP). Uplink: SISO

6.1.1. Modelo de propagación de Friis, espacio libre.

Las siguientes gráficas muestran el throughput obtenido en la simulación cuando se varía la distancia del UE al eNB. La figura 6.2 es para el flujo en sentido Downlink y la figura 6.2 para el caso de Uplink.

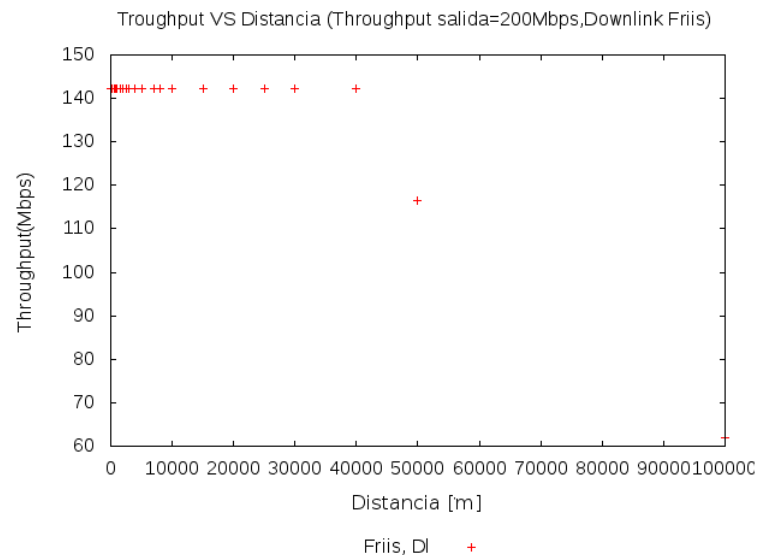


Figura 6.2: Modelo de propagación de Friis, Downlink.

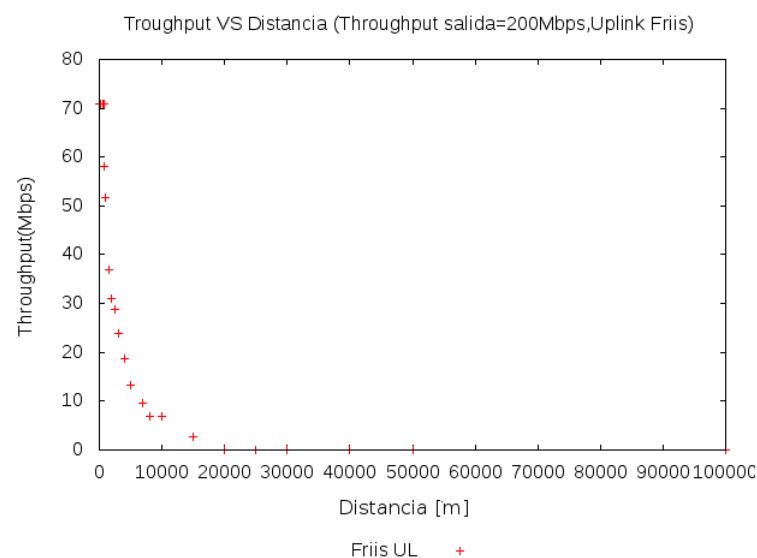


Figura 6.3: Modelo de propagación de Friis, Uplink.

En las gráficas anteriores se observa un throughput máximo de 142Mbps en Downlink y 70Mbps de Uplink. Utilizando el modelo de propagación de espacio libre observamos

que la máxima distancia a la cual el móvil tiene velocidad de Uplink no nula es a los 20km, sin embargo en Downlink se extiende más allá de los 100km, valores extremadamente excesivos en un entorno real, debido al poco impacto de la distancia en la atenuación de camino, motivo por el cual se descarta la utilización de este modelo de propagación.

En la figura 6.4 se muestra la pérdida de camino en función de la distancia del UE para los casos de Downlink y Uplink dado que las frecuencias de trabajo son distintas.

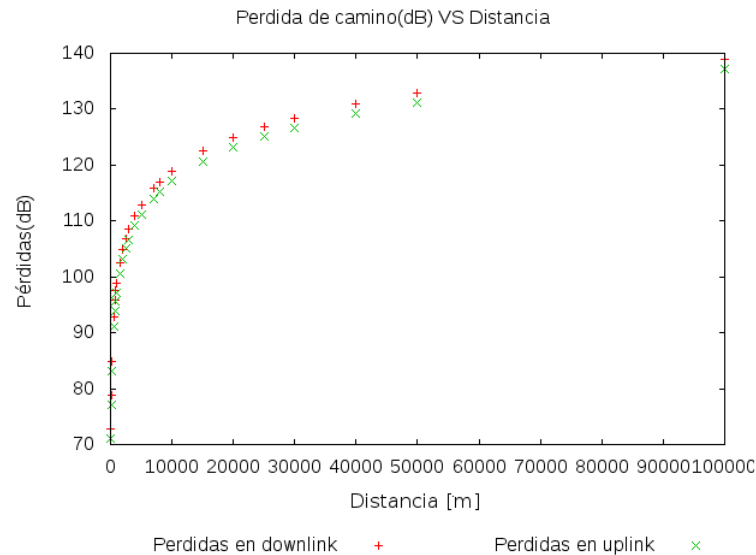


Figura 6.4: Pérdida de camino, modelo de espacio libre.

6.1.2. Modelo de propagación Friis modificado

El siguiente modelo analizado es el modelo de propagación de Friis modificado por el parámetro gamma. Este parámetro es un coeficiente de decaimiento con la distancia y se elige el valor de $\gamma=2,7$ debido a que es el correspondiente a entornos suburbanos.

A continuación se muestran los valores de throughput obtenidos para Downlink y Uplink.

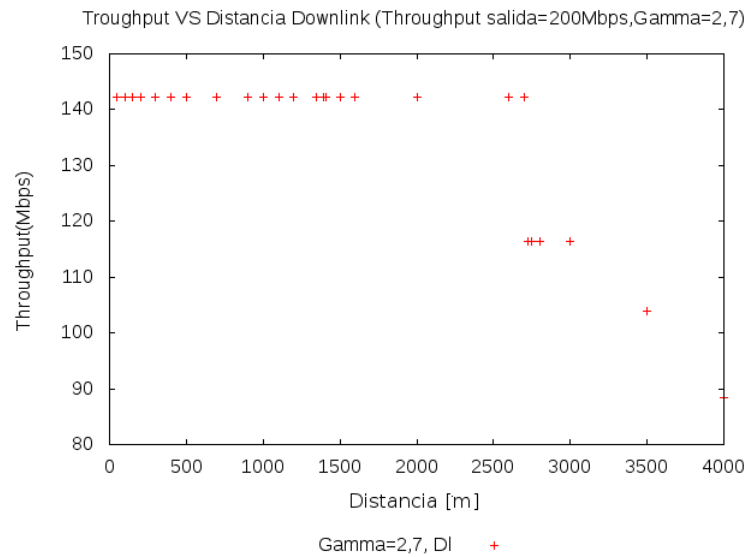


Figura 6.5: Modelo de Friis modificado, Downlink.

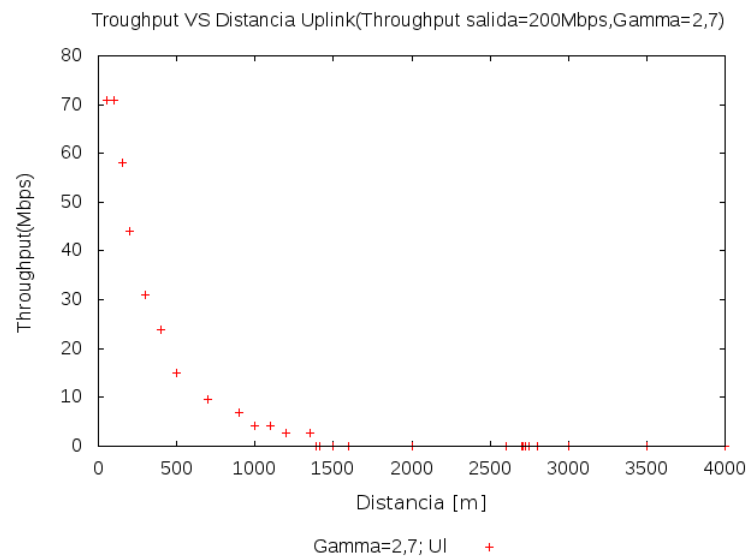


Figura 6.6: Modelo de Friis modificado, Uplink.

De las gráficas anteriores se observa que la máxima distancia a la cual el móvil tiene troughput de Uplink no nulo es aproximadamente a los 2km mientras que para el caso de Downlink a los 6km ya no se observa la presencia de throughput.

En la figura 6.7 se observa la pérdida de camino en función de la distancia para el modelo de propagación de Friis con $\text{Gamma} = 2.7$.

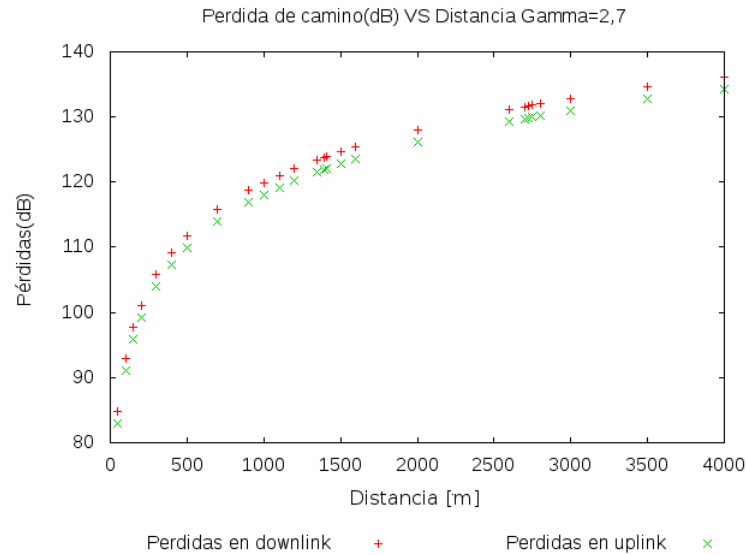


Figura 6.7: Pérdida de camino con gamma=2.7.

La figura 6.8 muestra la pérdida de camino en función de la distancia, obtenida para distintos valores de gamma. Se puede observar como las pérdidas aumentan al incrementar el parámetro de decaimiento. Este resultado es utilizado para estimar el parámetro gamma, una vez obtenidas las medidas de pérdida de camino en el relevamiento de datos de una red real. Esto permite aproximarse y ajustar las condiciones de entorno al sitio que sea desea simular.

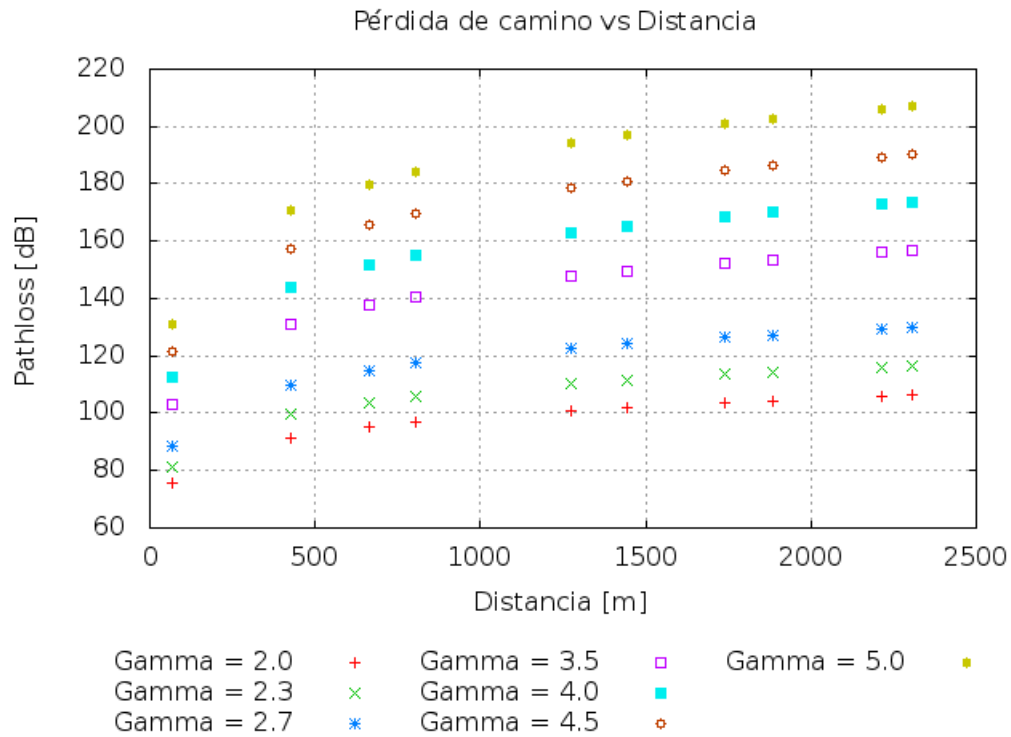


Figura 6.8: Pérdida de camino con distintos valores de gamma.

6.1.3. Modelo de propagación Cost231

Las siguientes figuras son las correspondientes al throughput obtenido tanto en Downlink como en Uplink para este modelo.

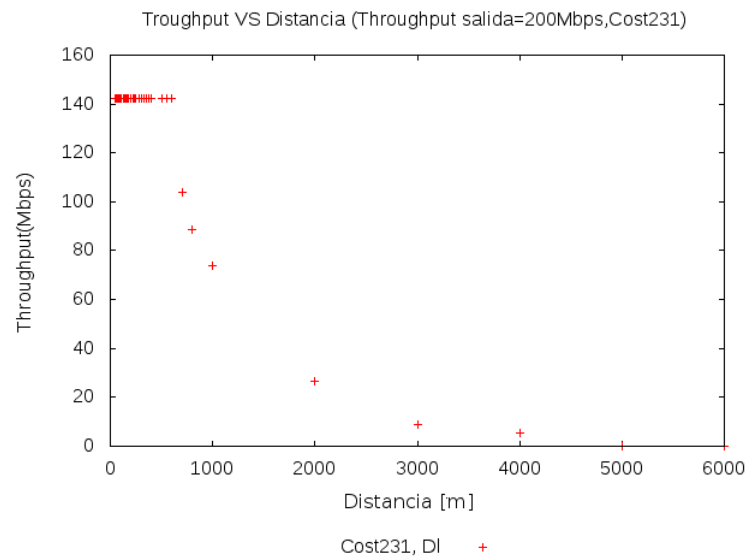


Figura 6.9: Modelo de propagación Cost231, Downlink.

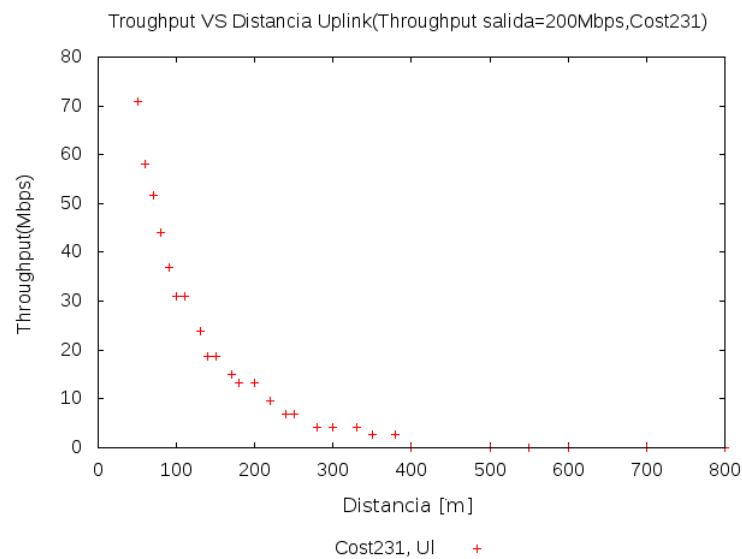


Figura 6.10: Modelo de propagación Cost231, Uplink.

Como se observa en la figura 6.10 a los 500 metros no se logra obtener throughput en el sentido de Uplink, el mismo en Downlink se extiende hasta los 6km aproximadamente, ver figura 6.12. En base a esto estimamos el radio de cobertura de la radio base en 500 metros por lo cual descartamos este modelo al tener una atenuación muy abrupta para Uplink, siendo el radio de cobertura un valor que no refleja la realidad en un entorno sub-urbano.

A continuación se muestra la gráfica 6.11 de pérdida de camino en función de la distancia para el modelo.

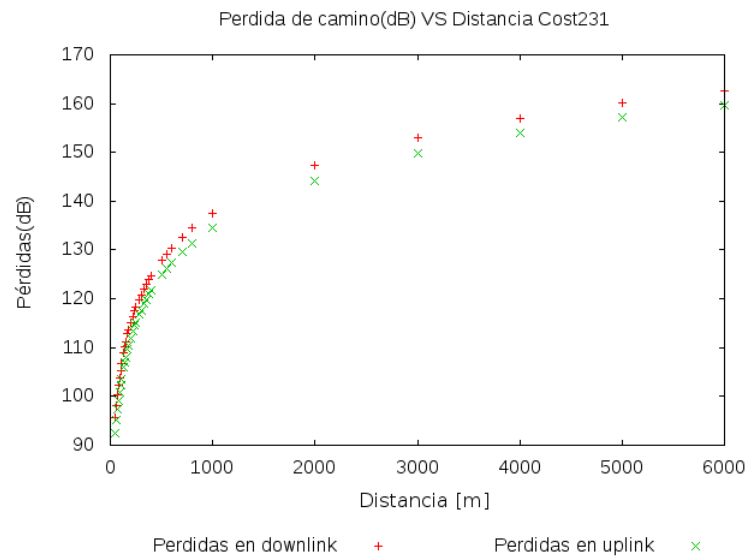


Figura 6.11: Pérdida de camino, modelo Cost231.

De los modelos estudiados se puede concluir que el modelo de Friis modificado por el parámetro gamma es el que mejor se adecúa a una red real para un entorno suburbano en función de las distancias máximas en las que existe cobertura. Además se pudieron obtener valores de velocidad de datos propios de la tecnología con las configuraciones realizadas. Utilizando este modelo se observa que en la frecuencia de operación elegida el radio de cobertura obtenido es aproximadamente 2km.

6.1.4. Relevamiento de datos en una red real LTE

A partir de las simulaciones realizadas se desarrolla un set de pruebas en una red real tal que permita efectivamente contrastar los resultados obtenidos. En esta sección se detallan las pruebas realizadas mencionando las herramientas utilizadas para el correcto desempeño de las mismas.

Se utilizan dos importantes herramientas de software para llevar adelante la captura de datos, xCal e lperf.

En el caso de la primera, xCal es un sistema de software automático y remoto desarrollado por Accuver para la recolección de datos de usuario, siendo utilizada por grandes empresas de Telecomunicaciones inalámbricas para la realización de pruebas y análisis de medidas en radio frecuencia que permiten estudiar el desempeño de la red en estudio. Este software permitió obtener medidas de RSRP -Reference Signal Received Power-, throughput en ambos sentidos, distancia al eNB y número de resource blocks utilizados entre otros.

Por otra parte, IPERF es una herramienta de software libre desarrollada para realizar medidas de ancho de banda y calidad de enlaces de red. La operativa de este software

consiste de un modelo cliente-servidor que se instala en dos dispositivos de red y puede funcionar cada uno de ellos tanto como cliente o servidor en distintos instantes. La aplicación servidor consiste en abrir un puerto en el equipo y consumir el tráfico recibido mientras que el cliente es el encargado de generar dicho tráfico con cierta cadencia, tipo de tráfico a nivel de transporte, TCP o UDP, así como también especifica el intervalo de tiempo durante el cual se desarrolla la prueba. Estas características de funcionamiento permiten hacer pruebas de throughput en los dos sentidos; el sentido de Uplink se testea iniciando la aplicación como servidor en un equipo del lado del core de la red y el cliente en el terminal del usuario. El sentido de Downlink consiste en el proceso inverso, el cliente opera en un equipo de la red y el servidor es instalado en el terminal.

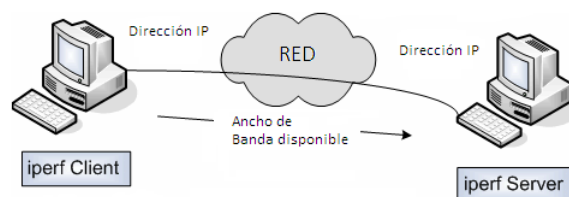


Figura 6.12: Esquema de transmisión en la herramienta IPERF.

En el momento en el que se decide trabajar con estas herramientas fue necesario una etapa de investigación y aprendizaje el cual se refleja en un período de adaptación y pruebas de las mismas.

Para desarrollar las pruebas se consideran factores como la elección del sitio, de forma que se cuente con un entorno similar al modelado, tipo de antenas instaladas, azimuth de las mismas de forma que se pueda estimar con cierta precisión la ganancia, potencia del transmisor, potencia del receptor y tipo de antena del receptor. A partir de esta información se puede verificar que la configuración del escenario de prueba coincide con el escenario utilizado en las simulaciones anteriores.

Una vez en el sitio donde se realizan las pruebas de “Drive Test”, se configura xCal para establecer un flujo en la red con múltiples sesiones de transferencia de archivos y comenzar la captura de datos. Se estima que al realizar 20 sesiones simultáneas de transferencias FTP se logra alcanzar los límites de capacidad teóricos de la red.

Luego de iniciada la captura se comienza con un recorrido que trata de ser radial y saliente del eNB en la dirección de máxima ganancia de la antena. Los datos relevados durante el recorrido son almacenados en archivos para luego ser procesados. Se continúa el recorrido visualizando el nivel de señal y throughput hasta que los mismos llegan a un nivel suficientemente bajo en el cual la transferencia de datos es interrumpida. Esta prueba es realizada en el mismo recorrido para transferencias de datos en sentido ascendente y descendente (Uplink y Downlink). Al efectuar estas pruebas es posible obtener una medida continua del nivel de señal y throughput disponible a nivel IP.

En Montevideo existen radio bases de LTE a las cuales se logró obtener acceso para realizar las pruebas y mediciones reales. Para llevar a cabo estas pruebas se eligió un sitio y una dirección en donde no existieran eNB cercanos para evitar escenarios de handover. Como contrapartida en el sitio donde se realizaron las pruebas se detectó algunas zonas cercanas de edificios y árboles por lo que se trató, dentro de lo posible, evitar pasar en el recorrido por estos lugares.

En la figura 6.13 se muestra el resultado de throughput en sentido Downlink obtenido durante el recorrido, para 20 sesiones simultáneas de transferencias FTP. Como se puede observar en la gráfica, los valores de throughput para distancias menores a 500 metros estuvieron alrededor de los 60Mbps llegando a picos por encima de los 70Mbps. Esta velocidad de datos puede verse limitada en cierto sentido debido a que la transferencia de paquetes ocurre bajo el protocolo de transporte TCP.

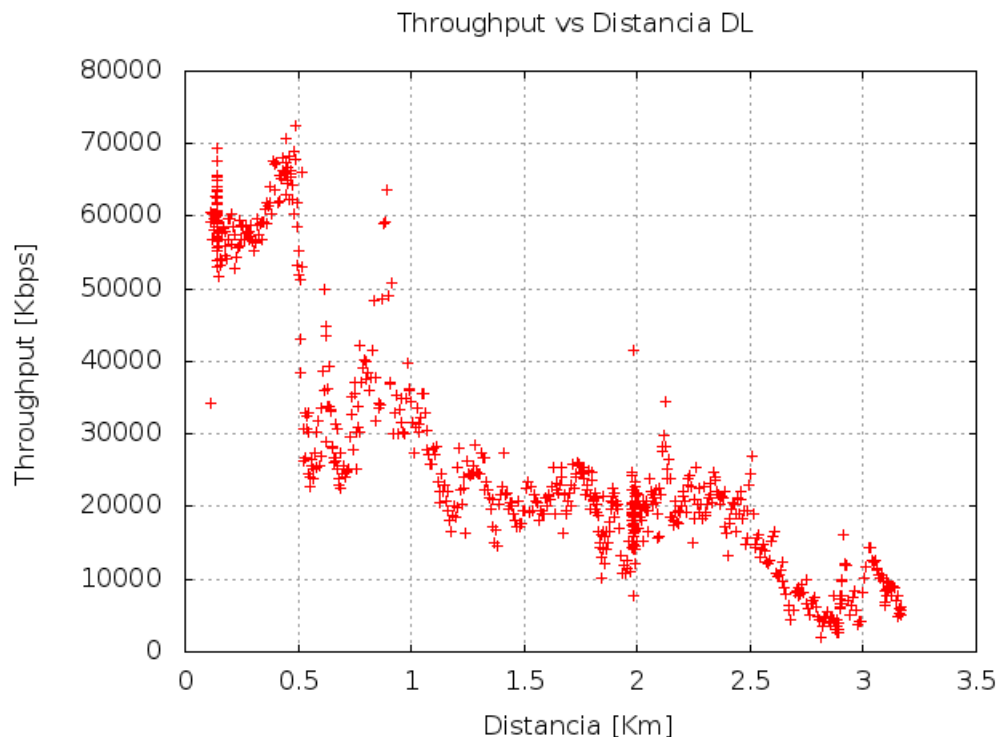


Figura 6.13: Throughput vs Distancia DL.

Cabe aclarar que los resultados obtenidos son valores menores a los esperados de las simulaciones debido a varios factores: movilidad y variabilidad del medio existiendo interferencias de otros obstáculos en movimiento que afectan la señal recibida, corrimiento de la frecuencia percibida por el UE debido al movimiento relativo entre éste y el eNB, conocido como corrimiento Doppler y por último, un factor crítico es la categoría del UE con que se realizaron las medidas, siendo el mismo categoría 3, lo cual implica que las velocidades máximas que el terminal de usuario puede alcanzar son 50Mbps para Uplink y 100Mbps para Downlink. El simulador no considera las categorías de los terminales por

lo tanto no tiene este tipo de restricción en el UE. Sin embargo, al considerar un escenario de simulación con múltiples UE este factor deja de ser crítico siendo posible alcanzar los valores de throughput en el eNB a nivel de celda tal como los simulados anteriormente.

Los efectos del entorno y del movimiento que más intervienen en la pérdida de señal recibida es el desvanecimiento multicamino ("Multipath Fading") que se presenta por dos razones distintas, "Long Term Fading" y "Short Term Fading". En el primer caso este efecto es atribuido a la topología del terreno y obstáculos presentes, los cuales provocan una variación temporal de la señal afectando el valor medio recibido. Mientras que el segundo efecto es provocado por las reflexiones de los obstáculos cercanos al terminal, este efecto se conoce como desvanecimiento de Rayleigh, dado que el comportamiento es similar al de una distribución de Rayleigh asociada a media longitud de onda.

En los 500 metros aproximadamente se puede observar una caída abrupta de throughput justificada por un incremento en la pérdida de camino (pathloss) debido la presencia de grandes edificaciones interpuestas en la línea de vista hacia la antena que no pudo ser evitada al realizar el relevamiento continuo. Luego de sorteado este obstáculo se observa un leve incremento en el throughput que como se visualiza, comienza a disminuir al aumentar la distancia. A su vez, la topología del lugar no tiene las características ideales para el relevamiento debido a que no es una zona plana sino que existen ondulaciones en el terreno.

En la figura 6.14 se observa como el throughput en sentido Uplink se encuentra alrededor de 1Mbps con picos de 2Mbps dentro de los primeros 500 metros de cobertura. Luego comienza a disminuir y a 3km se tiene una velocidad de transmisión nula.

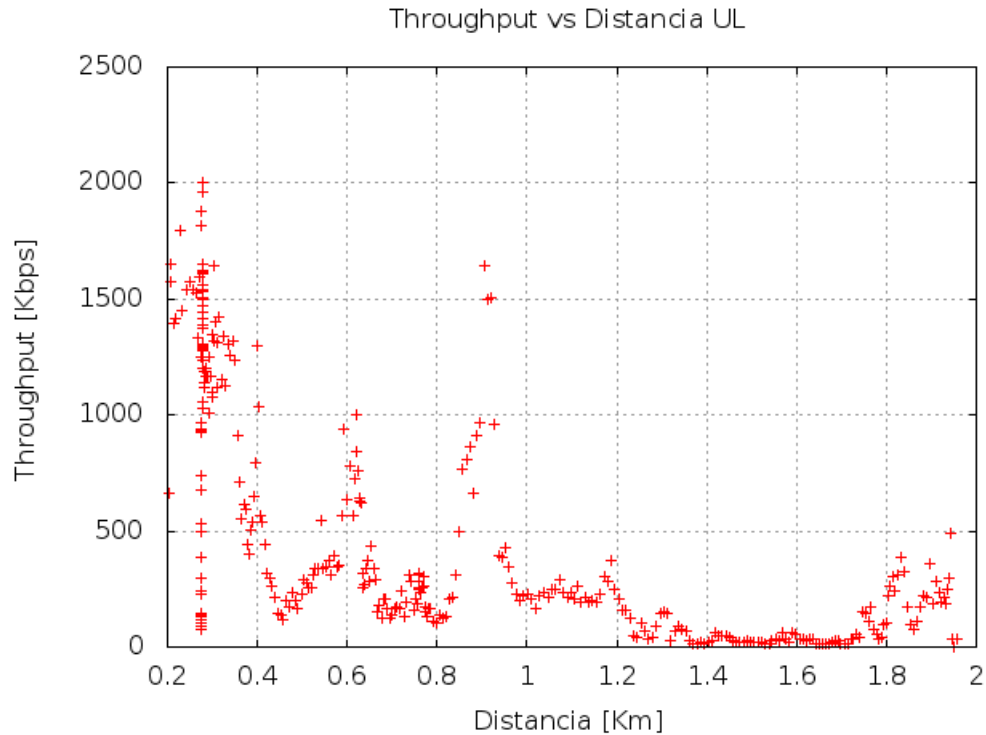


Figura 6.14: Throughput vs Distancia UL.

Para el relevamiento de datos con la herramienta IPERF, se eligen determinadas ubicaciones dentro del recorrido anterior para obtener medidas estáticas de throughput para el tipo de tráfico explicado anteriormente. En estos puntos se utiliza la aplicación por un tiempo de 20 segundos, donde se genera en el cliente, un flujo de datos UDP con una cadencia de 100Mbps para obtener los resultados del flujo en el servidor. Este valor permite superar el límite teórico de throughput en Uplink que brinda la tecnología. Tal como se menciona anteriormente estas aplicaciones se utilizan para relevar ambos sentidos de transmisión.

A continuación se presentan los resultados de las medidas realizadas con esta herramienta.

La figura 6.15 muestra el throughput de Downlink obtenido en los distintos puntos elegidos dentro del recorrido. Nuevamente se observa un comportamiento similar al obtenido con xCal, donde en los primeros 500 metros se tiene un throughput de 60Mbps y luego existe una caída de valores de throughput debido a la topología y obstáculos del lugar explicadas anteriormente.

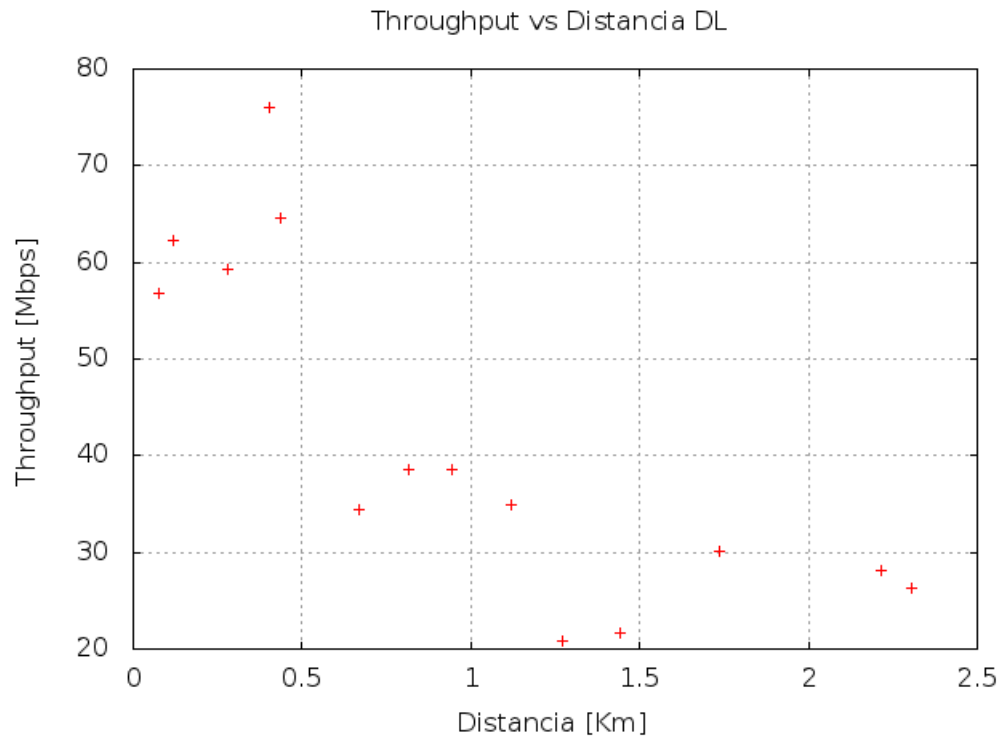


Figura 6.15: Throughput Downlink vs Distancia.

En el caso de throughput de Uplink los resultados obtenidos son:

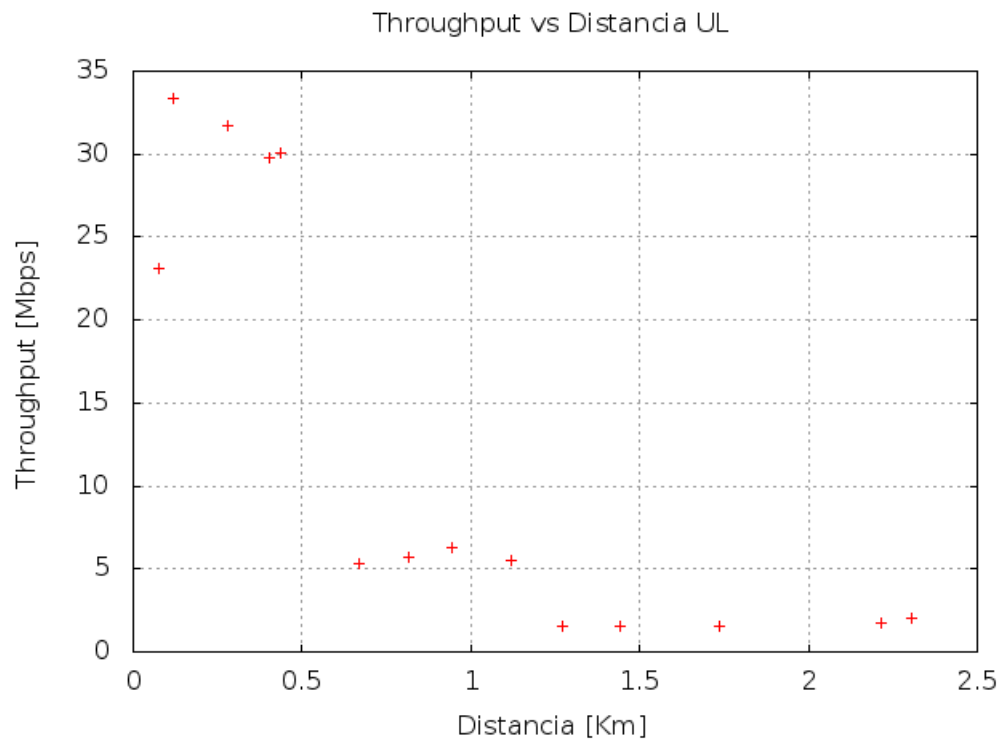


Figura 6.16: Throughput Uplink vs Distancia.

Para las pruebas realizadas con IPERF, los valores de throughput obtenidos en los distintos puntos son mayores a los obtenidos con xCal. En este último se utilizan en las pruebas flujos TCP, mientras que en IPERF se utilizan flujos UDP a nivel de transporte, los cuales permiten sobrecargar ampliamente los recursos brindados por el eNB. Otro factor que incide en la medida, es la movilidad que sufre el terminal para las pruebas de xCal.

Es importante destacar que ambas pruebas realizadas fueron obtenidas con tráfico generados de las herramientas sin existir otros usuarios en el área. Se pudo verificar que todos los recursos del nodo son asignados al modem LTE utilizado. Esto se realizó mediante el control de la cantidad de PRBs destinados al mismo durante el recorrido y las pruebas estacionarias.

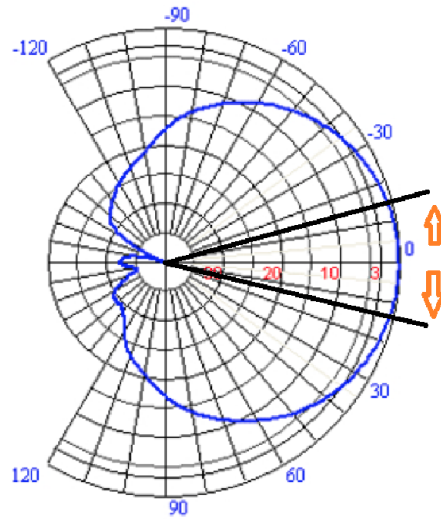
Por otra parte, se registraron los valores de pérdida de camino obtenidos durante el recorrido. Esto es calculado a partir del valor RSRP, valor registrado por xCal al realizar el cálculo de “Link Budget” presentado a continuación.

Los factores que intervienen en el cálculo son:

- Ganancia de la antena del terminal: $G_{at}=0$ dBi
- Ganancia de la antena del eNB: $G_{eNB}=18$ dBi
- Pérdidas asociadas a los jumpers y conectores en radio bases de tipo distribuidas: $L_{jumper}=-0.5$ dB
- Potencia transmitida en canales de control: $P_{Tx}=18$ dBm

Se considera que el valor L_{jumper} es un valor típico utilizado en radio bases de tipo distribuidas. Para obtener la medida de la pérdida de camino se utiliza el valor de RSRP medido por el terminal pues, el mismo es la potencia recibida en los canales de control que son transmitidos por el eNB a potencia constante. Se utiliza el valor de 18 dBm para P_{Tx} dado que esta es la potencia con la que son transmitidos los canales de control en la radio base que se realizaron las medidas.

Para establecer el valor de ganancia de la antena del eNB, se estudia el azimuth y patrón de radiación de la misma; ver figura 6.17. En base a éste, se fija el recorrido en el cual se realizan las medidas de forma tal que el mismo se aleje radialmente del eNB y sea en la dirección de máxima ganancia de la antena. Dado que las pruebas son realizadas en la ciudad de Montevideo no fue posible mantener una dirección radial constante pero se intentó que la misma sea lo menos cambiante posible. Con la ayuda de un mapa del sitio se establece la ruta a seguir verificando que el apartamiento en la dirección de máxima ganancia no supere los 15 grados como se muestra en la figura 6.17; esto permite mantener un valor constante en la ganancia de la antena (G_{eNB}).



Horizontal Pattern

Figura 6.17: Diagrama de radiación horizontal, antena eNB [24].

A partir de los datos anteriores y de el valor obtenido de RSRP se obtuvo el siguiente resultado:

$$L_{camino} = RSRP - G_{at} - G_{eNB} - L_{jumper} - P_{Tx}$$

La figura 6.18 muestra el valor de las pérdidas de camino obtenidas en las pruebas realizadas y las mismas son comparadas con distintos valores de gamma simulados.

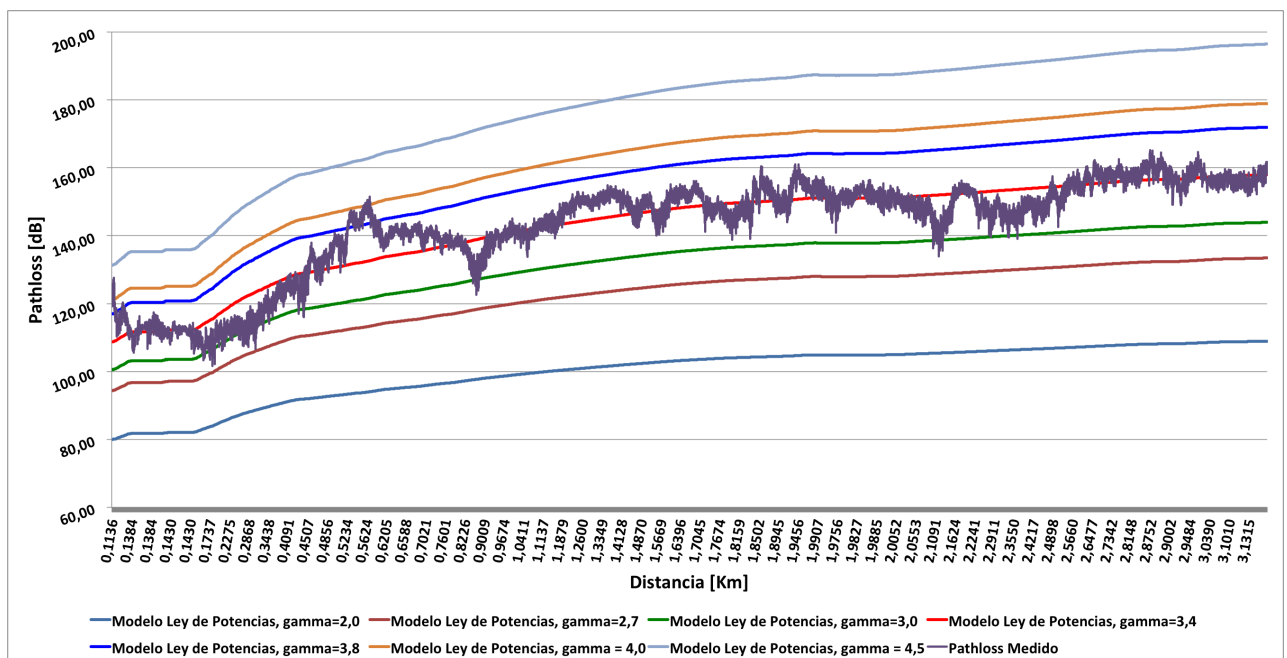


Figura 6.18: Ajuste de modelo de propagación. Pérdida de camino según la distancia.

Debido a que el entorno donde se realizaron las pruebas no es un entorno suburbano, tal como es el caso de estudio del proyecto, el modelo de propagación no se adapta a

las condiciones tomadas anteriormente donde se utiliza un factor de decaimiento de valor 2.7. A partir de la gráfica se puede realizar una estimación del valor de gamma para el modelo de propagación en el escenario donde se realizaron las medidas. El valor de gamma que mejor se adapta a los resultados obtenidos es gamma 3.4 (rojo). Aunque el estudio del lugar donde se realizaron las pruebas fue determinado de manera que mejor se adapte a las hipótesis consideradas, se obtuvo un comportamiento diferente.

Luego de planteado este escenario estamos en condiciones de concluir sobre las simulaciones realizadas teniendo en cuenta la siguiente consideración: el simulador de red utilizado, tal como se mencionó anteriormente, no implementa ni considera las variaciones presentes en el desempeño de la red cuando se trabaja con distintos tipos de terminal; en particular las pruebas realizadas se hacen utilizando un terminal categoría 3 que no permite superar un throughput mayor a 100 Mbps en sentido Downlink y 50 Mbps en sentido Uplink. Estos valores de capacidad son menores al throughput que permite obtener la configuración utilizada en el eNB por lo cual no es posible obtener mediante simulaciones resultados comparables para un UE con las medidas realizadas en una red real. Esta deficiencia en la implementación no impide de forma alguna obtener resultados positivos sobre la herramienta de simulación. Se puede observar en las figuras 6.18, 6.13 y 6.14 que el comportamiento de la red obtenido en las pruebas realizadas es muy similar al esperado mediante las simulaciones para un entorno de similares características con un eNB en iguales condiciones de configuración.

Bajo estas hipótesis es posible verificar que los resultados obtenidos mediante simulaciones se corresponden con el comportamiento esperable de una red real ante similares escenarios e igual configuración del eNB. Es importante destacar que si bien no se logró validar el simulador por los distintos elementos que se mencionaron anteriormente, el comportamiento de las simulaciones dieron resultados esperables.

Modelo de distintos tipos de tráfico de servicios demandados por un usuario LTE

El objetivo es modelar distintos tipos de tráfico de servicios demandados por un usuario sobre la red LTE y en base a eso crear un generador de tráfico con el simulador de red NS3.

Partiendo de la hipótesis de trabajo en la cual se analiza la red LTE con una única radio base, la misma abarca cierta área de cobertura donde existe una cantidad de usuarios distribuidos uniformemente. Estos usuarios estarán demandando diferentes servicios con ciertos requerimientos de calidad que la red tendrá que satisfacer, estableciendo lógicas de schedulers y asignación de recursos acorde a la posición geográfica y al servicio demandado por el usuario.

Se trabajó en el simulador para poder crear este ambiente de red, conociendo una cantidad total de usuarios, los mismos son distribuidos uniformemente dentro del área de cobertura de la radio base y estableciendo diferentes porcentajes para los distintos servicios podemos saber cual es la cantidad de usuarios que estarán realizando tráfico de voz o web browsing por ejemplo.

Conociendo la cantidad de usuarios que utilizan cierto servicio se genera el tráfico (característico al servicio) que los mismos demandan a la red y se analizará si se cumple la calidad de servicio y calidad de experiencia que el servicio requiere.

Se modelan los siguientes tipos de tráfico:

- Voz sobre IP (VoIP)
- Tráfico FTP
- Web Browsing
- Streaming de video

Al abordar un problema de modelado de tráfico de datos, hay tres niveles principales que podemos observar y modelar:

- Nivel de paquete
- Nivel de actividad
- Nivel de sesión

7.1. Modelo de tráfico VoIP

Para modelar este tipo de tráfico se eligió un modelo basado en una fuente sencilla de tipo ON-OFF. Este modelo considera períodos de actividad, durante el cual se da la transferencia de datos (período ON) seguido de períodos de inactividad (período OFF). Los tres niveles mencionados anteriormente en este modelo son:

Session Level

Este nivel modela el proceso de arribos de usuarios en la red. Los usuarios eligen que servicio van a utilizar, hacen uso del mismo y luego se desconectan de la red. El modelo de arribos de usuarios que se utiliza es un proceso de nacimiento y muerte como el descrito por el modelo de Poisson, con una tasa de arribos λ , independiente de los arribos anteriores y con una duración de parámetro μ .

Activity Level

Este nivel representa una sucesión de períodos de actividad (ON) y de inactividad (OFF) que describen el servicio. Por ejemplo, al realizar una llamada, el tiempo de ON refleja el momento durante el cual la persona transmite información al hablar, por ejemplo al decir una palabra. Por otra parte, las pausas que se realizan al hablar, es decir las pausas entre las palabras, se representan por el período OFF.

Packet Level

En este nivel es donde se decide como van a ser generados los paquetes, el tamaño de los mismos y como van a ser transportados.

En el tráfico de voz, el período de actividad está definido cuando el usuario está hablando mientras que en el período de inactividad el usuario está en silencio. Durante el período ON la fuente estará mandando paquetes a intervalos regulares T , el cual se define como el tiempo de paquetización y no se estará mandando paquetes durante el período OFF. Los períodos ON-OFF son modelados con distribuciones exponenciales de parámetros λ y β respectivamente.

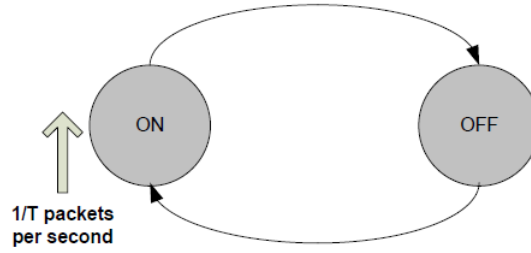


Figura 7.1: Modelo ON-OFF para VoIP [11].

A continuación se presentan las funciones de densidad para los períodos ON y OFF:

Período ON:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} \quad (7.1)$$

Duración media de Período ON:

$$T_{on} = \frac{1}{\lambda} \quad (7.2)$$

Período OFF:

$$f(x) = \beta \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (7.3)$$

Duración media de Período OFF:

$$T_{off} = \frac{1}{\beta} \quad (7.4)$$

Como la transmisión de paquetes se realiza durante el período ON, la tasa de transmisión T queda definida como:

$$T = \frac{1}{\lambda} \quad (7.5)$$

Para el proceso ON-OFF el promedio de tasa de paquetes queda definido por :

$$\frac{T_{on} * \lambda}{T_{on} + T_{off}} \quad (7.6)$$

Los valores usuales para los períodos T_{on} y T_{off} extraídos de distintas pruebas realizadas con tráfico de voz conversacional [12] , son:

$$T_{on} = 0,352s \text{ y } T_{off} = 0,650s.$$

Ejemplo-Paquetización de la voz con codec G711 y ventana de paquetización de 20ms.

Analizaremos la tasa de bits con la que se envía la información en el tráfico de voz sobre IP utilizando el codec G711, este codec no tiene compresión y es el que presenta

mejor calidad de voz; por otro lado es el utilizado en redes fijas, lo cual facilita la comparación entre las redes.

La tasa de bits producida por el codec G.711 es de 64Kbps y el tiempo de paquetización elegido es de 20ms. Se eligió este valor porque los órganos del habla son aproximadamente constantes en una ventana de 20ms, por lo que una muestra estará representando 20ms de voz, en otras palabras, esto es equivalente a muestrear 50 veces por segundo. Para formar el paquete de voz sobre IP se deben agregar encabezados para formar dicho paquete. Partiendo de un payload 160 Bytes ($\frac{64Kbps * 20ms}{8}$) se deben agregar 12 Bytes de encabezado RTP, 8 Bytes de encabezado UDP y 20 Bytes de encabezado IP. Formando un paquete de 200 Bytes y como se muestrea 50 veces por segundo, se obtiene una tasa de transmisión de 80Kbps por llamada a nivel IP. Dado que el simulador de red NS3 modela tanto el protocolo IP como el protocolo UDP, no es necesario agregar al payload los encabezados de estos protocolos. El único protocolo que no implementa el simulador es el Real Time Protocol, por lo que al simular debemos sumar al valor del payload los 12 Bytes correspondientes al encabezado de este protocolo, dando como resultado 172 Bytes.

Usando el modelo ON-OFF, tomando el promedio de la tasa de paquetes definida por (7.6) y considerando que se transmiten datos solamente durante un tiempo T_{on} se obtiene la siguiente ecuación: $\frac{0,352 * 80}{1,002} = 28,1kbps$, ésta es la tasa de transmisión promedio de paquetes obtenida del modelo.

Ejemplo-Paquetización de la voz con codec RTP AMR 12.2 y ventana de paquetización de 20ms.

El codec RTP AMR 12.2 es el que se utiliza en el modelo de tráfico para VoIP en redes LTE, el mismo cuenta con un sistema de detección de voz VAD y un generador de ruido de confort el cual reduce la cantidad de bits enviados durante los períodos de silencio. De manera análoga al caso anterior procedemos al cálculo del tamaño de paquetes y la tasa de transmisión que se logra obtener con este codec. La tasa de bits que produce este codec es de 12.2 Kbps y con una ventana de paquetización de 20ms se logra tener un payload de 31 Bytes por muestra. Partiendo de dicho payload se agregan encabezados para formar el paquete IP, 12 Bytes de encabezado RTP, 8 Bytes de encabezado UDP y 20 Bytes de encabezado IP. De esta manera se logra un paquete de 71 Bytes y al muestrear 50 veces por segundo, se obtiene una tasa de transmisión de 28.4Kbps por llamada a nivel IP. Utilizando esta tasa de transmisión durante un tiempo T_{on} se tiene como resultado un nuevo valor de transmisión promedio en el modelo ON-OFF de 9.98Kbps. Nuevamente, tomando en cuenta las características del simulador, el payload ingresado en la simulación es de 43 Bytes por muestra (31 Bytes del payload original+12 Bytes de encabezado RTP), lo cual genera una tasa de transmisión de la aplicación de 17.2 kbps durante el tiempo T_{on} .

7.2. Implementación de Modelo VoIP

El modelo de tráfico VoIP fue implementado al porcentaje de usuarios que utilizan este servicio dentro del área de cobertura de la radio base y el codec elegido fue el RTP AMR 12.2 [6] ya que es el codec utilizado en redes LTE. El simulador implementa una aplicación ON-OFF la cual pudimos adaptar para representar correctamente el modelo, estableciendo un flujo de datos desde un remote host al usuario y desde el usuario al remote host. El remote host se encuentra conectado a la red LTE mediante el SGW/PDN-GW.

Se utilizó el Modelo de Erlang B para un sistema con pérdidas, es decir si una llamada no encuentra los recursos, la misma se pierde y no se la coloca en ningún sistema de espera. Bajo las hipótesis de este modelo, se consideró el proceso de arribo de llamadas como un proceso de Poisson. Además el tiempo entre arribos de llamadas y la duración de las llamadas tiene una distribución exponencial cuyos parámetros son elegidos por el usuario de la herramienta para poder simular distintos escenarios de uso.

Hipótesis tomadas del modelo de Erlang B para llamadas VoIP:

1. Si una llamada no encuentra recursos, la misma se pierde.
2. Al perderse una llamada la misma no se la coloca en un sistema de espera.
3. Se tiene como hipótesis que la persona que llama no reintenta inmediatamente.
4. El proceso de arribo de llamadas es un proceso de Poisson.
5. El tiempo entre arribos de llamadas tiene una distribución exponencial.
6. Cuando un usuario accede a los recursos lo hace a cualquiera de ellos por igual.

El programa recibe como datos los parámetros de las distribuciones para el arribo de las llamadas, la duración de las mismas y el número de llamadas que realizan los usuarios VoIP para que comience el flujo de información. A su vez se creó un contador de tiempos el cual se va actualizando según la duración de las llamadas obtenidas de la distribución de probabilidad y el número de llamadas. Este contador permite indicarle al programa cuando terminar de simular, es decir, se termina la simulación cuando todas las llamadas se completaron.

7.3. Modelo de tráfico FTP

Cuando un usuario realiza una descarga de un archivo almacenado en un servidor se utiliza el protocolo FTP (File Transfer Protocol). Para realizar tráfico FTP se necesita un tamaño de archivo el cual se va a descargar, por lo que siempre existe un tráfico en Downlink mientras hayan datos para descargar. Cabe destacar que el servicio FTP utiliza TCP como protocolo de transporte.

El modelo se caracteriza por dos parámetros: el tamaño de archivo y un tiempo de lectura del archivo. El tiempo de lectura hace referencia al tiempo que transcurre entre el fin de la descarga de un archivo y el comienzo de la descarga de un nuevo archivo. Ambos parámetros corresponden a distintas funciones de probabilidad, donde el tamaño del

archivo corresponde a una distribución de probabilidad Lognormal y el tiempo de lectura a una distribución de probabilidad exponencial.

La figura 7.2 muestra las distribuciones de probabilidad que caracterizan al modelo explicado anteriormente. Estas distribuciones, con sus correspondientes parámetros fueron implementadas en el modelo de FTP para los usuarios que utilizan este servicio.

Parameter	Statistical characterization
File size S	Truncated lognormal distribution mean = 2 Mbytes, standard deviation = 0.722 Mbytes, maximum size = 5 Mbytes (before truncation) PDF: $f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x > 0 \quad \sigma = 0.35, \mu = 14.45$
Reading time D	Exponential distribution with mean = 180 seconds PDF: $f_x = \lambda e^{-\lambda x} \quad x \geq 0 \quad \lambda = 0.006$

Figura 7.2: Modelo FTP [6].

7.4. Implementación del Modelo FTP

En el área de cobertura de la radio base existe un porcentaje de usuarios los cuales están haciendo uso del servicio FTP. En el simulador se implementa este tipo de tráfico utilizando una aplicación llamada BulkSendApplication, la cual se envían los datos desde un servidor FTP al usuario de la manera más rápida posible hasta lograr alcanzar el envío total del archivo. El protocolo de transporte utilizado es TCP y el envío de datos se intenta realizar a un flujo constante. Cuando el buffer en el transmisor está completo, la aplicación espera a liberar espacio en el buffer y comienza a mandar nuevamente los datos.

7.5. Modelo Web Browsing

El modelo de Web Browsing se caracteriza por períodos activos e inactivos, en el período activo se representa la etapa de descarga de información de una página web mientras que los períodos inactivos son debidos a tiempos de lectura del usuario y tiempos de análisis de información del propio navegador. Los períodos activos e inactivos son resultados de la propia interacción de los usuarios donde el packet call representa el pedido de información y el tiempo de lectura el análisis de la página web por el usuario.

La figura 7.3 muestra el formato de traza de paquetes para una sesión web browsing. Cuando un usuario está realizando tráfico web, la descarga de una página web se lo conoce como un packet call. El packet call está compuesto por un Main Object, objeto principal de la página y un número aleatorio de objetos embebidos, los cuales forman parte de la estructura de una página web.

Los períodos inactivos, donde no se envía información, ocurren entre la descarga del objeto principal y el objeto embebido, como también entre los distintos objetos embebidos. El otro período inactivo que se utiliza en este modelo es el tiempo de lectura de la página, tiempo que transcurre entre los distintos packet call.

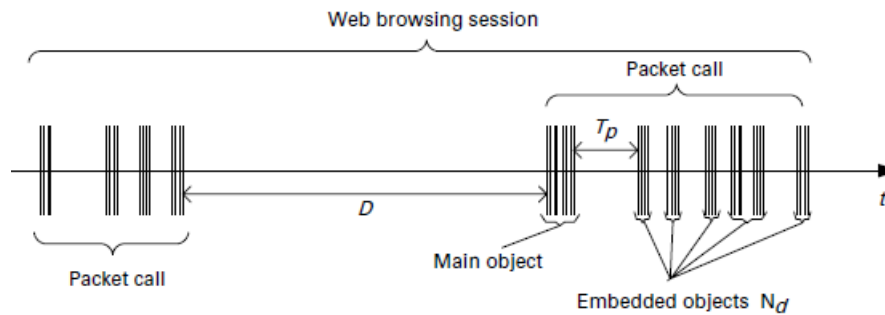


Figura 7.3: Web Browsing, packet call [6].

Todos los parámetros que utiliza el modelo tienen una distribución de probabilidad asociada. La figura 7.4 muestra las distribuciones asociadas al tamaño del objeto principal, tamaño de los objetos embebidos, número de objetos embebidos, tiempo de lectura y el tiempo de análisis.

Es importante notar que en el modo de transferencia de datos utilizado para HTTP/1.1 los objetos son descargados en forma serial y bajo el protocolo de transporte TCP.

Component	Distribution	Parameters	PDF
Main object size (S_M)	Truncated Lognormal	Mean = 10710 bytes Std. dev. = 25032 bytes Minimum = 100 bytes Maximum = 2 Mbytes	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], x \geq 0$ $\sigma = 1.37, \mu = 8.35$
Embedded object size (S_E)	Truncated Lognormal	Mean = 7758 bytes Std. dev. = 126168 bytes Minimum = 50 bytes Maximum = 2 Mbytes	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], x \geq 0$ $\sigma = 2.36, \mu = 6.17$
Number of embedded objects per page (N_d)	Truncated Pareto	Mean = 5.64 Max. = 53	$f_x = \frac{\alpha k}{x^{\alpha+1}}, k \leq x < m$ $f_x = \left(\frac{k}{m}\right)^\alpha, x = m$ $\alpha = 1.1, k = 2, m = 55$ Note: Subtract k from the generated random value to obtain N_d
Reading time (D_{pe})	Exponential	Mean = 30 sec	$f_x = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0$ $\lambda = 0.033$
Parsing time (T_p)	Exponential	Mean = 0.13 sec	$f_x = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0$ $\lambda = 7.69$

Figura 7.4: Parámetros Modelo Web Browsing [21].

7.6. Implementación de Modelo Web Browsing

Este modelo fue implementado en el simulador al porcentaje de usuarios que utiliza el servicio de Web browsing dentro del área de cobertura de la radio base. Tomando como base la aplicación BulkSendApplication utilizada para el modelo FTP, donde se envían los flujos de datos de la manera más rápida posible bajo el protocolo de transporte TCP, se modifica la misma para adaptar el modelo de Web browsing estudiado anteriormente.

La nueva aplicación llamada BulkSendApplicationWebTraffic incorpora todos los parámetros del modelo. Una vez que esta aplicación comienza, se obtienen de sus respectivas distribuciones de probabilidad el tamaño del objeto principal, el tamaño de los objetos embebidos, número de objetos embebidos, tiempos de análisis y tiempos de lectura para comenzar el envío de información desde un servidor web al usuario. El parámetro que se debe ingresar como dato al simulador, es la cantidad de páginas web que el usuario va a visitar.

Se crearon los siguientes scripts para el correcto funcionamiento de la aplicación:

- **bulk-send-application-webtraffic.cc**
Script en lenguaje C++ que implementa la aplicación mencionada.
- **bulk-send-application-webtraffic.h**

Encabezado del archivo bulk-send-application-webtraffic.cc.

- **bulk-send-helper-webtraffic.cc**
Helper utilizado para poder invocar a la aplicación de Web Traffic desde el escenario construido.
- **bulk-send-helper-webtraffic.h**
Encabezado del archivo bulk-send-helper-webtraffic.cc
- **wscript**
Ns-3 utiliza el sistema Waf por lo cual para integrar las clases creadas al sistema se modifica el archivo Wscript el cual está escrito en lenguaje Python y se encuentra en la carpeta src/applications, en él se indica que módulos agregar para el correcto funcionamiento de la aplicación creada.

7.7. Modelo para Video Streaming

Al realizar Video Streaming, el usuario selecciona un video a descargar y durante la descarga de los datos existe un flujo de datos desde un servidor hacia el usuario. El tiempo de envío de información está directamente relacionado con el tamaño del video elegido, el cual es igual al tiempo de simulación para este modelo. Cada trama de video arriba a un intervalo de tiempo regular T , determinado por el número de tramas por segundo fps (Frames per second). Cada trama se descompone a su vez en un número fijo de segmentos, cada uno transmitido como un paquete individual.

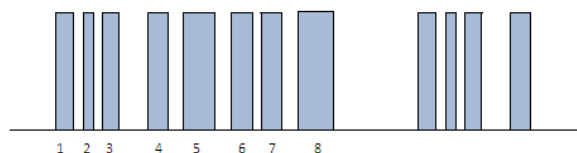


Figura 7.5: Modelo Video Streaming.

El tamaño de los paquetes (o segmentos) posee una distribución probabilista de Pareto truncada. El retardo debido a la codificación en el codificador de video introduce intervalos de retardo entre los paquetes de una trama. Estos intervalos son modelados también mediante una distribución Pareto truncada.

En la figura 7.6 se pueden observar los parámetros de las distribuciones mencionadas, se asume que la fuente de video tiene una velocidad de 64Kb/s:

Information types	Inter-arrival time between the beginning of each frame	Number of packets (slices) in a frame	Packet (slice) size	Inter-arrival time between packets (slices) in a frame
Distribution	Deterministic (Based on 10fps)	Deterministic	Truncated Pareto (Mean= 50bytes, Max= 125bytes)	Truncated Pareto (Mean= 6ms, Max= 12.5ms)
Distribution Parameters	100ms	8	K = 20bytes $\alpha = 1.2$	K = 2.5ms $\alpha = 1.2$

Figura 7.6: Parámetros Modelo Video Streaming [21].

7.8. Implementación del Modelo de Video Streaming

Este modelo fue implementado en el simulador al porcentaje de usuarios que utiliza el servicio de Video Streaming dentro del área de cobertura de la radio base.

Teniendo en cuenta que el streaming de video es un tráfico en tiempo real, se tomó como base la aplicación del simulador UdpClient, la cual envía tráfico desde un servidor hacia el usuario, a través del protocolo de transporte UDP (User Datagram Protocol) y se construyó una nueva aplicación para modelar este tipo de tráfico. La nueva aplicación llamada UdpClientVS incorpora los parámetros mencionados para el modelo de Video Streaming.

La aplicación UdpClientVS envía paquetes a través del protocolo UDP de tamaño variable, obtenidos de la distribución de Pareto mencionada anteriormente. Los valores de tamaño de paquete y tramas por segundo mencionados en la figura 7.6 son modificados de forma de obtener un flujo de 600 Kbps. Este flujo refleja la velocidad del codec H.264 Main Profile utilizado en este tipo de tráfico, para una resolución de 640x360 con 30 tramas por segundo. Este codec es utilizado en los videos de la página YouTube, [26]. Los parámetros para la nueva distribución de Pareto tiene como media 350 Bytes y un tamaño máximo de 600 Bytes para el mismo valor del parámetro α .

Cabe destacar que la cantidad de paquetes a enviar depende de la duración de cada video, para la simulación se consideraron videos de duración aleatoria de hasta un máximo de 10 minutos debido a que el tiempo de simulación es muy grande para escenarios más largos, pudiendo llegar a durar más de 24 horas una simulación de estas características. Una vez finalizado el envío de un paquete se agenda el envío del siguiente luego de un tiempo aleatorio obtenido de la distribución Pareto para tiempo, con los parámetros que se expresan en la figura 7.6.

Como puede observarse en la figura 7.6, cada trama está compuesta por 8 paquetes y la cantidad de tramas depende de la duración del video debido a que se envía una trama cada 0.033ms (30 tramas por segundo), por lo cual la cantidad de paquetes de

tamaño aleatorio que se debe mandar es:

$$N^{\circ} \text{de paquetes} = \frac{\text{Duracion del video}(s)}{1/30s} * 8 \quad (7.7)$$

Para construir esta nueva aplicación se crean los siguientes archivos:

- **udp-client-VS.cc**
Script en lenguaje C++ que implementa la aplicación mencionada.
- **udp-client-VS.h**
Encabezado del archivo udp-client-VS.cc.
- **udp-client-VS-helper.cc**
Helper utilizado para invocar a la aplicación UdpClientVS desde el escenario construido, de forma de poder ingresar los parámetros del modelo fácilmente (tasa de arribo de sesiones de Video Streaming y cantidad de sesiones que realiza cada usuario).
- **udp-client-VS-helper.h**
Encabezado del archivo udp-client-VS-helper.cc.
- **wscript**
Ns-3 utiliza el sistema Waf por lo cual para integrar las clases creadas al sistema se modifica el archivo Wscript el cual está escrito en lenguaje Python y se encuentra en la carpeta src/applications, en él se indica que módulos agregar para el correcto funcionamiento de la aplicación creada.

Es importante mencionar que existen prioridades en un servicio portador EPS destinado a cada tipo de tráfico pero en esta etapa de desarrollo del simulador las mismas no están implementadas. No hay un esquema de prioridades sobre el tráfico de un servicio sobre otro.

7.9. Análisis de Calidad de Experiencia

Para culminar con el proceso de modelado e implementación de tráfico se analiza la calidad de experiencia de los usuarios.

Las salidas obtenidas de las simulaciones contienen, para los distintos tipos de tráfico que se cursaron por usuario, medidas de los parámetros de QoS establecidos por la recomendación G.1010 citada en el capítulo 3.

A continuación se mencionan los parámetros que se obtienen como salida para los distintos tipos de tráfico modelados luego de realizar la simulación:

Tal como lo establece la tabla 3.3 para el tráfico VoIP se miden los siguientes parámetros de QoS y se verifica el cumplimiento de los umbrales fijados por la norma:

- Tiempo de transmisión en un sentido:
 - Preferido: Menor a 150ms
 - Aceptable: Menor a 400ms (Asumiendo que se implementa un correcto control de Eco)

- Jitter: Para este parámetro no se utiliza el valor propuesto por la norma G1010, ya que se considera que valores de jitter menores a 25ms pueden ser corregidos mediante la correcta utilización de un buffer, llamado "Jitter buffer", [27].
- Pérdida de paquetes
Menor a 3 %

Para el tráfico Web Browsing, de acuerdo a la tabla 3.4 los parámetros que se obtienen son:

- Tiempo de descarga de la página Web
Preferido: Menor a 2s por página
Aceptable: Menor a 4s por página
- Pérdida de paquetes: 0 %

Para el tráfico de descargas de archivos se decidió analizar la calidad de experiencia que percibe el usuario que cursa ese tipo de tráfico, comparando el tiempo de descarga del archivo con el tiempo que tomaría la descarga si el usuario lo estuviera descargando a través de un servicio de ADSL fijo, para eso se fija la velocidad de descarga con la cual se quiere hacer la comparación.

Para el tráfico de Video Streaming, se opta por analizar la calidad de experiencia con la que los usuarios perciben este tipo de servicio, evaluando el throughput con el que llegan los paquetes desde el servidor del video al terminal de usuario y comparándolo con el throughput de salida. Debido a que comúnmente se utiliza un buffer para regular la velocidad con la que se despliega el video, mientras la velocidad de llegada de los paquetes sea mayor a la velocidad con la que se codificó el video, el buffer actúa regulando la velocidad con la que se decodifica y se despliega el video. Sin embargo, si la velocidad con la que llegan los paquetes es inferior a la velocidad de codificación, el usuario percibirá el servicio con mala calidad de experiencia ya que no es posible decodificarlo correctamente. Por esta razón si existe una variación del throughput en el terminal mayor al 0.1 % del throughput de salida del servidor, se considera que el usuario tiene una mala calidad de experiencia.

Para estimar la Calidad de Experiencia de los usuarios simulados se utilizó un método indirecto, según la clasificación de métodos visto en la sección 3.3.2 del capítulo 3. Se utilizan los parámetros mencionados anteriormente que miden el desempeño de la red para cada servicio y a través de un programa escrito en lenguaje C++, QoE.cc, se verifica si se cumplen con los umbrales fijados por la recomendación G.1010 para cada parámetro en los casos de VoIP y Web Browsing. Para Video Streaming y FTP se utiliza el método mencionado anteriormente.

Si se satisfacen los umbrales de todos los parámetros de cierto servicio se concluye que el usuario percibió ese servicio con buena Calidad de Experiencia.

Programa principal

8.1. Características del programa

La idea presentada en el proyecto es desarrollada en un programa que permite realizar simulaciones de los distintos escenarios que se desean estudiar. Se configuraron los distintos parámetros de la red vistos en el capítulo 5 entre los cuales se encuentran la arquitectura de red, los modelos de propagación, el tipo de scheduler a utilizar así como también los diferentes tipos de tráfico que los servicios demandan.

En este capítulo se hace énfasis en el programa creado para simular el escenario deseado. De acuerdo a los diferentes parámetros de entrada al programa, es posible crear un escenario de red donde distintos usuarios demandan diferentes servicios. Los servicios utilizados son los especificados anteriormente:

- Servicio VoIP
- Web browsing
- FTP
- Video streaming

El programa crea el escenario planteado y genera el flujo de los distintos tipos de tráfico de cada servicio, para luego poder estimar, a través de un análisis posterior de los datos obtenidos, la calidad de experiencia con la que el usuario percibió el servicio.

Al programa se lo puede dividir en tres partes, configuración de la red, generación de tráfico y obtención de información de flujos. Estas son partes diferenciadas pero complementarias entre sí las cuales se explican a continuación.

8.2. Configuración de la red

En la primera parte del programa es donde se configura la red LTE. Utilizando las hipótesis de trabajo, el escenario planteado es el de una única radio base atendiendo una cierta cantidad de usuarios distribuidos uniformemente alrededor de la misma. Por lo tanto se ubica el eNB en el centro de coordenadas y se distribuyen a los usuarios uniformemente alrededor del mismo, dentro de un radio de cobertura tomado como parámetro de entrada.

Cabe mencionar que los usuarios no tienen movilidad por lo que su ubicación, una vez realizado el sorteo, permanece constante durante la simulación. Se debe ingresar como parámetro de entrada, la cantidad total de usuarios que utilizan la red y el porcentaje de usuarios que demandan cada servicio en particular. A continuación se menciona la configuración realizada en lo que respecta al eNB.

Dado que es necesario abarcar un área de cobertura bajo el radio ingresado, se configura la antena del eNB como una antena isotrópica para poder radiar energía uniformemente en todas las direcciones sin beneficiar a ningún usuario en particular.

Otro parámetro importante a configurar es el ancho de banda en el cual se trabaja, como se explica en el capítulo 5.4, los anchos de banda para LTE varían de 1,4MHz a 20MHz y éste es un parámetro que se le ingresa al programa junto con la banda de operación que se desea trabajar. Existen 40 bandas de operación para la tecnología y según la banda en la que se desee trabajar se configuran los canales de EARFCN tanto en Downlink como en Uplink para la correcta transmisión de datos.

El tipo de scheduler a utilizar es otro parámetro de entrada al programa; se puede elegir entre los schedulers vistos en el capítulo 5.6, Round Robin y Proportional Fair. A su vez, se configuran los servicios portadores EPS explicados en la sección 5.3 para poder realizar el envío de paquetes IP del usuario. Los mismos fueron configurados dependiendo del tipo de servicio ofrecido. Respecto a este punto es importante destacar que si bien el simulador en la versión de LENA utilizada permite configurar las EPS Bearer, esta versión no realiza el mapeo entre las EPS Bearer y las Radio Bearer.

Los modelos de propagación que se pueden utilizar al realizar la simulación son los tres modelos vistos en la sección 5.1 y se puede elegir con cual de ellos trabajar. También es necesario configurar las potencias de transmisión tanto en el eNB como en el UE; estos valores son también ingresados como parámetro de entrada al programa.

Se tiene en cuenta las técnicas de MIMO explicadas en la sección 5.7 las cuales son configuradas en la red y es posible elegir cualquiera de estos modos. El modo de transmisión más utilizado en redes LTE para obtener buenos resultados de throughput es el modo 3.

Debido a las características de los servicios en los que se trabaja, es necesario la implementación del S-GW y P-GW por lo que se debe utilizar el simulador bajo la configuración del modelo de EPC, el cual proporciona los medios para simular la conectividad IP extremo a extremo en un sistema LTE.

A los usuarios de la red se los diferencia por el servicio que utilizan, por lo tanto, se crean 5 contenedores de nodos de los cuales 4 de ellos son para los diferentes UE que utilizan los distintos servicios y el quinto contenedor es el del eNB. El siguiente paso, es el proceso de registrar a todos los usuarios a la red y al único eNB para poder realizar el correcto flujo de datos.

Para poder simular los distintos esquemas de flujos de datos, se instala un servidor para cada servicio con comunicación Point to Point hacia el PDN-GW. Para ello se crea la comunicación con un flujo de datos de 100 Gbps, con tamaño de MTU 1500 Bytes y sin retardo de paquetes para que esta conexión no sea una limitante del sistema. Además, se configuran las direcciones IP asignando un rango de direcciones tanto a los UE como a los servidores. Tal como se explica en la sección 4.3 del capítulo 4, los UE tienen las direcciones 7.0.0.0 con máscara 255.0.0.0. Los servidores tienen los siguientes rangos de direcciones: para el servidor VoIP 1.0.0.0 con máscara 255.0.0.0; para el servidor de web traffic 2.0.0.0/8; para el servidor de FTP 3.0.0.0/8 y para el servidor de video streaming 4.0.0.0/8.

8.3. Generación de Tráfico

Como fue explicado anteriormente, se considera como parámetro de entrada la cantidad total de usuarios que utilizan la red junto con los porcentajes de usuarios que demandan un servicio en particular. Fue necesario hacer una división entre la configuración de la red y la generación de tráfico ya que implican el desarrollo de diferentes tareas que luego fueron unidas para crear el escenario de simulación.

A cada servicio se lo modela mediante las características de tráfico correspondientes tal como se analiza en el capítulo 7 para luego poder ser implementados en el programa.

En primer lugar se debe ingresar como parámetro de entrada la cantidad total de usuarios de la red para luego especificar en porcentajes la cantidad de usuarios que hacen uso de los servicios elegidos.

Servicio VoIP

Se toma como parámetro de entrada el porcentaje de usuarios que utilizan el servicio VoIP y además se debe ingresar la cantidad de llamadas que cada UE realiza. En la sección 7.2 se desarrolló la implementación del modelo de tráfico para este servicio. La aplicación ON-OFF implementada con codec AMR 12.2 se instala a los UE y al servidor de VoIP para simular una comunicación bidireccional. A su vez se instala la aplicación PacketSink la cual recibe y consume los paquetes enviados, la aplicación es instalada tanto en el UE como en el servidor en los puertos indicados para cada uno. Se configura al UE para comenzar a recibir los datos en el puerto 2000 y el mismo se incrementa según las llamadas que realice para que no exista colisiones de flujos distintos.

Basado en el modelo de Erlang, el comienzo de una llamada está indicado por la tasa de arribos de llamadas, donde el usuario realiza la cantidad de llamadas ingresadas como parámetro las cuales tienen una cierta duración. Por lo tanto, un parámetro

de entrada considerado es el valor medio de la tasa de arribo (T_a) de llamadas que el UE realiza para determinar el parámetro λ ($1/T_a$) de la distribución exponencial y la duración media de las llamadas (T_d) para poder determinar el parámetro μ ($1/T_d$) de la distribución exponencial.

Servicio web browsing

Para el servicio de web browsing también se toma como parámetro de entrada el porcentaje de usuarios que lo utilizan para luego modelar e implementar el tráfico característico de este servicio, ver sección 7.5. La aplicación BulkSendApplicationWebTraffic creada es instalada en la fuente de tráfico, siendo en este caso el servidor de web traffic, además se instala la aplicación PacketSink en el UE y en el servidor para poder recibir y consumir los paquetes. La aplicación es instalada en ambos nodos debido a que la comunicación es realizada mediante el protocolo TCP, por lo cual existe flujo en sentido de Uplink para que el UE envíe los ACKs correspondientes. El tamaño de paquetes para la transmisión a nivel de aplicación elegido es de 1024 Bytes.

Otro parámetro de entrada considerado es la cantidad de páginas web que el usuario visita junto con la tasa de visitas de sitios web. Es decir, el valor medio de visitas a páginas web (T_v) que un usuario realiza, el cual es modelado como una distribución exponencial de parámetro $1/T_v$.

Se considera que el usuario puede estar viendo varias páginas en forma paralela durante la navegación, como si se abrieran varias pestañas en un navegador web, visitando una única página por pestaña.

Servicio FTP

En este servicio también se toma como parámetro de entrada el porcentaje de usuarios que realizan una descarga de archivo mediante el protocolo FTP. El modelo usado para representar este servicio es el descrito en la sección 7.3 junto con su implementación. Se toma como parámetro de entrada la cantidad de sesiones FTP que el usuario realiza y el valor medio de los arribos de sesiones (T_s).

El tamaño de los archivos que descargan los usuarios fueron obtenidos de los modelos descritos en la sección 7.3 y se considera que los usuarios al iniciar una sesión FTP, realizan una única descarga de archivo. Es decir no hay tiempo de lectura entre la descarga de un archivo y el siguiente. Se considera que los usuarios pueden realizar varias sesiones FTP y las mismas comienzan según una distribución de probabilidad exponencial de parámetro $1/T_s$.

Para realizar la descarga desde un servidor FTP, se instala la aplicación BulkSendApplication en el servidor de FTP y la aplicación PacketSink en ambos para la recepción y consumo de paquetes enviados mediante el protocolo TCP. El envío de datos se realiza mediante paquetes de tamaño de 1024 Bytes hasta poder completar el tamaño del archivo a transmitir.

Servicio video streaming

Al igual que con los otros servicios, se toma como parámetro de entrada el porcentaje de usuarios que lo utiliza, la cantidad de sesiones de Video Streaming que realiza cada usuario y la tasa de arribo de sesiones (Tvs) a la red LTE modelado por la distribución exponencial de parámetro $1/Tvs$. La aplicación de este servicio es implementada de manera que el usuario puede realizar varias sesiones de video streaming pero en cada sesión se descarga un único video de duración aleatoria. La duración máxima de video elegida es de 10 minutos.

Se instala la aplicación creada `UdpClientVS` en el servidor de video streaming y el `PacketSink` es instalado solamente en los UE ya que se trabaja bajo el protocolo UDP en un solo sentido de la comunicación. Los paquetes son recibidos en distintos puertos en los UE, dependiendo la cantidad de descargas que se realicen.

8.4. Obtención de información de flujos

Para obtener información acerca de los distintos flujos de datos correspondiente a cada tipo de tráfico se utiliza la herramienta Flow Monitor que posee el simulador. Esta herramienta detecta automáticamente todos los flujos que pasan en la red y los clasifica según dirección IP de origen, dirección IP de destino y según los puertos de origen y destino.

Con Flow Monitor es posible obtener el valor de los siguientes parámetros:

- `timeFirstTxPacket`: Este parámetro contiene la medida de tiempo del momento en el que se transmite el primer paquete.
- `timeLastTxPacket`: Parámetro que indica el momento en el que se transmite el último paquete.
- `timeFirstRxPacket`: Parámetro que contiene la medida de tiempo del momento en el que se recibe el primer paquete.
- `timeLastRxPacket`: Parámetro que indica el momento en el que se recibe el último paquete.
- `delaySum`: Este parámetro contiene la suma de todos los retardos extremo a extremo para los paquetes recibidos.
- `jitterSum`: Este parámetro contiene la suma de todos los valores de jitter extremo a extremo que ocurre para todos los paquetes recibidos del flujo (variaciones de retardo). Se define el jitter de un paquete como la variación del retardo relativo al último paquete del flujo.

$$Jitter(P_N) = |Delay(P_N) - Delay(P_{N-1})|$$

- txBytes, txPackets: Número total de bytes y paquetes transmitidos en el flujo.
- rxBytes, rxPackets: Número total de bytes y paquetes recibidos en el flujo.

A través de estos datos es posible obtener el valor de los parámetros necesarios para realizar el análisis de Calidad de Experiencia según el tipo de tráfico, tal como se menciona en la sección 7.9 del capítulo 7:

- $Delay_{promedio} = \frac{delaySum}{rxPackets}$
- $Jitter_{promedio} = \frac{jitterSum}{rxPackets-1}$
- Throughput de transmisión: $Throughput_{tx}(Mbps) = \frac{txBytes*8}{1024^2*(timeLastTxPacket-timeFirstTxPacket)}$
- Throughput de recepción: $Throughput_{rx}(Mbps) = \frac{rxBytes*8}{1024^2*(timeLastRxPacket-timeFirstRxPacket)}$

Para obtener el valor de estos parámetros se crean cuatro instancias de Flow Monitor en el programa de simulación y se instala cada una de ellas en un contenedor de User Equipment y en su correspondiente servidor, según el tipo de tráfico que se trate. De esta forma se obtienen mediciones de cada flujo entre los UE y los servidores ubicados en la red PDN.

Simulaciones y análisis de resultados

Una vez realizado el análisis del simulador se estudia la capacidad de la red para cada tipo de tráfico, estimando el número máximo de usuarios que una celda LTE puede soportar sin afectar significativamente el nivel de calidad de experiencia que percibe cada usuario. En este ámbito se puede definir la capacidad de la red como el máximo número de usuarios que pueden cursar determinado tipo de tráfico sin percibir degradación de servicio, es decir con buena calidad de experiencia.

Al realizar las simulaciones para los distintos tipos de tráfico se constató que el simulador poseía un problema en la implementación de la asignación de recursos en sentido de Uplink. En particular se observa que para un solo usuario utilizando el servicio de VoIP, el mismo posee buena calidad de experiencia, incluso ubicado a una distancia de 2km de la radio base. Sin embargo, al realizar la simulación con dos usuarios cursando este servicio en simultáneo y posteriormente haciendo el estudio de la calidad de experiencia, se observa que no se satisfacen para ninguno de los usuarios los umbrales fijados de retardo y jitter en la sección 7.9 del capítulo 7 en el sentido de Uplink. Dado que este tipo de tráfico es bidireccional se concluye que ambos usuarios percibieron el servicio con mala Calidad de Experiencia.

En base a estos resultados se investigan las distintas clases que implementan la capa física y la capa MAC del simulador, además de la clase que implementa el scheduler utilizado, todas ellas desarrolladas en lenguaje C++. Al realizar este análisis se observa que en la clase que implementa el scheduler Proportional Fair, el mismo está implementado sólo en el sentido de Downlink, mientras que en Uplink utiliza el algoritmo del scheduler Round Robin. Por otro lado, se observa que el valor fijado en el scheduler para el parámetro CqiTimerThreshold, el cual representa el número de TTIs durante el cual el valor del Channel Quality Indicator (CQI) es válido para cada usuario, se encuentra configurado en 1000TTI, esto es 1 segundo dado que la duración de cada TTI es de 1ms. Al variar este parámetro configurándolo en 2TTI, es decir 2ms, tomando como referencia la configuración de una red de LTE real, se logra que el scheduler reasigne los recursos de radio para cada usuario en función de su CQI cada intervalos de tiempo menores. De esta forma se logra disminuir significativamente los tiempos de espera para obtener recursos, lo cual se refleja en una amplia mejora en los valores obtenidos de retardo y jitter para este tipo de tráfico.

9.1. Simulación de VoIP

Una vez optimizado el desempeño del simulador en relación a la asignación de recursos de radio a los usuarios, se realizan distintas simulaciones para analizar la capacidad de una celda LTE para este tipo de tráfico.

Para simular este tipo de tráfico se configura la red de la misma manera que la detallada en la sección 6.1. Se realizan simulaciones donde se varía el radio de cobertura de la radio base y el número de usuarios distribuidos uniformemente alrededor de la misma para analizar los distintos comportamientos. A su vez, es necesario ingresar los parámetros referidos a la demanda de los usuarios que cursan este tipo de tráfico sobre la red; estos son:

- Cantidad de usuarios que realizan VoIP.
- Número de llamadas que realizan los usuarios.
- Tasa media de arribo de llamadas.
- Duración media de las llamadas.

La primer simulación realizada es en un radio de cobertura de 500 metros, con una cantidad de usuarios igual a 50. Cada usuario realiza una sola llamada con una tasa de arribo de 1 segundo y una duración media de 30 segundos. Se utiliza un valor pequeño de tasa de arribos de llamadas ya que se estudia el comportamiento de la red cuando todos los usuarios están haciendo uso del servicio VoIP de manera simultánea; semejante a lo que ocurre durante la “Busy Hour”. Por otro lado, el valor seleccionado para la duración media de llamadas no es un valor alto para evitar una extensa duración de simulación.

El resultado obtenido en este caso es que el 97 % de los usuarios percibieron el servicio con buena calidad de experiencia, cumpliendo con los requisitos exigidos en la sección 7.9. Solo dos usuarios percibieron el servicio con mala QoE debido a que en ambos, el porcentaje de pérdida de paquetes es mayor al 3 %. La pérdida de paquetes ocurrió únicamente en el sentido de Uplink, en uno de los casos se perdió un 3,45 % del total de los paquetes enviados superando el umbral, mientras que para el otro usuario se perdió un 3,2 %. Por detalles de estos resultados ver apéndice B.

En la siguiente simulación se extiende el radio de cobertura a 1000 metros y se simulan 10 usuarios cursando VoIP con las mismas características de tasa media de arribo y duración media de llamadas del caso anterior. Se obtiene como resultado que el 100 % de los usuarios percibieron el servicio con buena calidad de experiencia. Por lo tanto, en la siguiente simulación se incrementa el número de usuarios manteniendo la misma configuración anterior, se simulan 50 usuarios obteniendo como resultado que el 72 % de los usuarios tuvieron buena QoE.

En la última simulación analizada para VoIP, se ubican aleatoriamente 100 usuarios en un radio de cobertura de 700 metros. En este caso, solo 10 usuarios percibieron el

servicio con buena calidad de experiencia. Se observa que en el sentido de Downlink todos los flujos cumplen con los umbrales especificados para tener buena calidad de experiencia, mientras que en el sentido de Uplink, 90 flujos no cumplen con estos umbrales. Este fenómeno indeseado se explica, tal como se menciona en el comienzo de este capítulo, debido a que el scheduler Proportional Fair del simulador implementa el mecanismo Round Robin para asignar los recursos a los usuarios que transmiten en sentido ascendente. Este scheduler, reparte la misma cantidad de recursos entre una cantidad mayor de usuarios que la simulación anterior, de esta manera la mayor parte de los usuarios se ven perjudicados. A diferencia de lo que hace el scheduler Proportional Fair en el sentido descendente, en este caso los usuarios que tienen peores condiciones de radio, no podrán utilizar el canal de radio por más tiempo de forma que se compensen las deficiencias de señal y así obtener una calidad de servicio similar a la de aquellos usuarios que tienen buenas condiciones de radio. Debido a este método de asignación de recursos, la mayoría (90 %) de los usuarios se vieron perjudicados.

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos para estas simulaciones.

Simulación	Cantidad de UE	Radio de cobertura (metros)	% Buena QoE	Cantidad de UE con mala QoE	Condición de falla
VoIP	50	500	97%	2	Pérdida de paquetes
VoIP	10	1000	100%	-	-
VoIP	50	1000	72%	14	Pérdida de paquetes
VoIP	100	700	10%	90	Pérdida de paquetes, Delay, Jitter

Figura 9.1: Simulaciones de VoIP.

9.2. Simulación de Video Streaming

Considerando las características estudiadas de la red y del escenario de simulación, se realiza la simulación de demanda de este tipo de servicio por parte de los UE. Como se menciona en la sección 7.8 la tasa de transmisión del codec con el que se trabaja es de 600Kbps. Teniendo en cuenta el throughput máximo obtenido en el análisis del simulador para el modelo de propagación de Friis modificado (sección 6.1.2) de 142Mbps se puede realizar una aproximación de la cantidad de usuarios que pueden ser atendidos con cierta calidad de servicio y cumpliendo los parámetros de calidad de experiencia estudiados en 7.9. Como resultado de esta estimación se observa que la cantidad de usuarios que pueden estar haciendo uso de este servicio al mismo tiempo es de aproximadamente 237 usuarios dentro de un radio de cobertura de 2000 metros, radio máximo de cobertura para el throughput mencionado como se determinó en el capítulo 6.

A continuación se describen las simulaciones realizadas para poder determinar si efectivamente se pueden atender 237 usuarios utilizando el servicio de Video Streaming, cumpliendo con los parámetros de calidad de experiencia para el modelo de propagación de Friis modificado con valor de gamma igual a 2,7.

La primer simulación realizada fue dentro de un radio de cobertura de 2000 metros, para una cantidad de 200 UE distribuidos uniformemente alrededor del eNB. Las características de la red con las que se trabaja son el ancho de banda de 20MHz en la banda de operación 4 AWS según 3GPP, banda utilizada en Uruguay, el scheduler es el Proportional Fair y las potencias de los transmisores de la radio base y del móvil fueron configuradas en 47 dBm y 23 dBm respectivamente como se explicó en la sección 5.2. La técnica MIMO utilizada para este caso es 2x2 configurada en el modo de transmisión 3, visto en la sección 5.7 y se consideró una ganancia de antena en el eNB de 20 dBi. Es importante mencionar que el flujo de datos de este servicio es en todo momento sentido Downlink utilizando el protocolo UDP.

Se establecieron como datos de entrada la cantidad de sesiones de video streaming que los UE realizan, en este caso una única sesión con una tasa media de arribo de sesiones de 1 segundo para los 200 UE. Este valor es elegido de esta forma para poder simular un escenario donde luego de un determinado tiempo (variable exponencial de valor medio 1 segundo) los 200 UE están haciendo uso de la red en simultáneo, tal como ocurre durante la “Busy Hour”.

Realizada la simulación para este escenario se obtuvo un 98 % de los usuarios con buena calidad de experiencia teniendo en cuenta los valores referencia tomados en 7.9. Solamente 3 usuarios percibieron una mala calidad de experiencia, estos usuarios no satisfacen la condición de throughput considerada. Por ejemplo, el throughput obtenido a nivel IP para uno de los UE es de 0.628223Mbps cuando se envía a una tasa de transmisión de 0.628979Mbps a nivel IP del servidor, por lo cual el valor obtenido esta por debajo del margen del 0,1 % (ver 7.9).

Los siguientes datos muestran el flujo capturado para la transmisión desde el servidor con dirección IP 4.0.0.2 hacia el UE con direccion IP 7.0.0.191 para un caso de mala calidad de experiencia. El flujo es el número 47 de los 200 flujos establecidos en la simulación.

- **Flow ID:** 47
- **Src Addr:** 4.0.0.2 **Dst Addr:** 7.0.0.191
- **TxPackets:** 7200
- **RxPackets:** 7200
- **Throughput en el UE (Mbps):** 0.628223
- **Throughput en servidor (Mbps):** 0.628979
- **Mean Delay (s):** 0.012383
- **Paquetes perdidos:** 0
- **Tiempo de Descarga (s):** 15.582

Se repite la simulación incrementando la cantidad de usuarios para el mismo radio de cobertura y con las mismas consideraciones de red. Se ingresa como parámetro de entrada una cantidad de 230 UE utilizando este servicio, obteniendo un 94 % de los usuarios dentro de los márgenes establecidos para buena calidad de experiencia. Los 13 usuarios que tuvieron mala calidad de experiencia, no satisfacen la condición de throughput medio considerada.

Por último se repite la simulación con una cantidad de 250 UE en un radio de cobertura de 1500 metros con las mismas consideraciones de red y el resultado obtenido es de un 27 % de buena calidad de experiencia. Los 182 UE que tuvieron mala calidad de experiencia no cumplieron el umbral de throughput considerado. En esta simulación se puede ver como al demandar un ancho de banda mayor al ofrecido por la celda, la calidad de experiencia de los UE fue afectada y la asignación de recursos afectó el servicio para los 182 UE. Esto fue debido a que la tasa de transmisión de los UE que está fijada por el codec elegido de 600Kbps no pudo ser alcanzada por los UE al incrementar la cantidad de usuarios, los mismos lograron alcanzar la capacidad máxima de tasa de transmisión de la celda al intentar proporcionar el servicio a todos ellos. En este caso se puede observar que el scheduler utilizado realiza un reparto justo y equitativo de los recursos de radio afectando a todos los usuarios; esto provoca una baja en el throughput medio percibido por cada uno de ellos lo cual implica que no sea posible cumplir con los criterios de QoE en la mayoría de los casos.

Simulación	Cantidad de UE	Radio de cobertura (metros)	% Buena QoE	Cantidad de UE con mala QoE	Condición que falla
Video Streaming	200	2000	98%	3	Throughput
Video Streaming	230	2000	94%	13	Throughput
Video Streaming	250	1500	27%	182	Throughput

Figura 9.2: Simulaciones de Video Streaming.

9.3. Simulación de tráfico Web Browsing

Para simular este tipo de tráfico se debe ingresar, además de los parámetros de configuración de la red, el número de usuarios que realiza descargas de páginas web, el número de páginas que se descargan y la tasa media de arribo de las sesiones de Web Browsing. Para todas las simulaciones se considera que el usuario descarga una sola página web y como tasa media de arribo se utiliza 1 segundo, por las mismas consideraciones realizadas para los servicios anteriores de manera de lograr la simultaneidad.

Se realizan simulaciones distribuyendo a los usuarios en distintos radios de cobertura y con distintas cantidades de usuarios utilizando el servicio.

Para un radio de cobertura de 1000 metros se simulan 50 usuarios obteniendo como resultado que el 100 % de ellos percibió el servicio con buena calidad de experiencia, lo cual implica tal como se describe en la sección 7.9, que todas las páginas se descargaron

en un lapso de tiempo menor a los 4 segundos. Dado el buen resultado obtenido para este servicio se realiza la misma simulación pero distribuyendo 70 usuarios uniformemente alrededor del eNB, de esta manera se constata que el 81 % de los usuarios tuvo buena QoE.

Por último se realiza una simulación a 700 metros también con 70 usuarios utilizando el servicio, el resultado obtenido es que el 100 % de los usuarios percibió el servicio con buena calidad de experiencia.

La figura 9.3 muestra las simulaciones realizadas.

Simulación	Cantidad de UE	Radio de cobertura (metros)	% Buena QoE	Cantidad de UE con mala QoE	Condición de falla
Web Browsing	50	1000	100%	-	-
Web Browsing	70	1000	81%	13	Duración de la descarga
Web Browsing	70	700	100%	-	-

Figura 9.3: Simulaciones de Web Browsing.

Es importante destacar que, si bien este tipo de tráfico utiliza ambos canales, a diferencia de lo que ocurre con el tráfico VoIP, el canal de Uplink solamente es utilizado para enviar el reconocimiento de los paquetes del protocolo TCP (Acks). Por este motivo, el hecho de que el reparto de recursos en el canal de Uplink sea un factor crítico debido a que se utiliza el scheduler Round Robin, no influye significativamente en los resultados para este tipo de tráfico.

9.4. Simulación de tráfico FTP

Para este tipo de tráfico y al igual que para Web Browsing, se deben ingresar como parámetros, además de los necesarios para configurar la red, el número de usuarios que realizan descargas de archivos a través del protocolo FTP, el número de descargas que realizan en paralelo y la tasa media de arribo de sesiones de este tipo de tráfico a la red.

Para obtener la calidad de experiencia con la que los usuarios percibieron el servicio se utiliza el método descrito en 7.9, comparando el tiempo que demora la descarga del archivo con el tiempo que tomaría realizar la misma descarga si el usuario estuviera utilizando un servicio ADSL de velocidad de pico contratada de 2Mbps en sentido Downlink, lo cual se corresponde con una velocidad promedio de descarga de 0,5Mbps.

La tasa media de arribo de sesiones FTP elegida es de 1 segundo para poder simular un escenario donde luego de un tiempo variable determinado por la distribución exponencial de media 1 segundo, todos los usuarios estarán haciendo uso de este servicio en simultáneo.

Se realiza una primer simulación con 60 usuarios cursando este tipo de tráfico sobre la red, en un radio de cobertura de 1000 metros. Configurando el umbral de velocidad media de descarga para comparar en 0,5Mbps, se observa que el 95 % de los usuarios

percibió este servicio con buena calidad de experiencia. Los 3 usuarios que no cumplieron con los umbrales de QoE son debido a que tuvieron un porcentaje de pérdida de paquetes por encima del umbral establecido y la duración de la descarga tardó más tiempo que lo que tardaría utilizando un servicio ADSL convencional de 2Mbps de velocidad en sentido Downlink.

Por otro lado se realiza una simulación con un número menor de usuarios cursando este tipo de tráfico pero distribuidos en un radio mayor al anterior. Se distribuyen 20 usuarios en un radio de 1500 metros obteniéndose como resultado que el 95 % de estos tuvo buena calidad de experiencia. Nuevamente la condición que no se cumplió y provocó que los usuarios percibieran este servicio con mala calidad de experiencia fue el porcentaje de pérdida de paquetes ya que superó el umbral considerado (0 % para este tipo de tráfico).

Las simulaciones de FTP se presentan en la siguiente figura.

Simulación	Cantidad de UE	Radio de cobertura (metros)	% Buena QoE	Cantidad de UE con mala QoE	Condición de falla
FTP	60	1000	95%	3	Pérdida de paquetes, duración de descarga
FTP	20	1500	95%	1	Pérdida de paquetes

Figura 9.4: Simulaciones de FTP.

Al igual que lo que ocurre con el tráfico de Web Browsing, para este tipo de tráfico, el canal de Uplink es utilizado solo para enviar los reconocimientos del protocolo TCP.

En el apéndice B se muestran detalladamente los datos obtenidos en las diferentes simulaciones de los distintos tipos de tráfico.

9.5. Simulación de distintos servicios concurrentes

Una vez analizada la capacidad que posee una celda LTE para cada tipo de servicio estudiado y bajo distintas condiciones de radio de cobertura, se analiza qué ocurre cuando los distintos usuarios demandan varios servicios de datos sobre la red.

Para ello se realiza la simulación de distintos escenarios de concurrencia de servicios.

Se realizó una primera simulación ubicando aleatoriamente 20 usuarios en un radio de cobertura de 500 metros, los cuales demandan servicios de Web Browsing, descargas FTP y sesiones de Video Streaming en distintos porcentajes:

- Porcentaje de usuarios realizando sesiones de descarga de páginas web: 60 %
- Porcentaje de usuarios realizando sesiones de descarga de archivos: 10 %
- Porcentaje de usuarios realizando sesiones de Video Streaming: 30 %

Se obtuvo del programa que analiza la calidad de experiencia de los usuarios que tanto el 100 % de quienes realizan descargas de páginas web como de los usuarios que realizan descargas de archivos, percibieron el servicio que utilizaron con buena calidad de experiencia. Sin embargo, en el caso de los usuarios que realizaron sesiones de Video Streaming, ninguno de ellos (0 %) experimentó el servicio con buena calidad de experiencia. Este resultado es posible en un escenario real y se justifica debido a que el scheduler elegido, Proportional Fair, realiza un reparto justo y equitativo entre todos los usuarios sin reservar y destinar recursos de forma exclusiva que permitan garantizar cierto bitrate constante para los usuarios que cursan este servicio sobre la red. Este tipo de tráfico es muy sensible en cuanto al throughput medio requerido. Como se menciona en la sección 7.9, un usuario percibe este tipo de servicio con buena calidad de experiencia siempre y cuando el throughput medio de descarga recibido por el usuario no sea inferior a la tasa con la que se envían los paquetes desde el servidor que aloja el video. Se puede destacar en este caso que se hace referencia en todo momento al throughput medio, dado que mediante el uso de un buffer se permiten variaciones instantáneas del throughput recibido admitiendo la existencia de ráfagas en donde la transferencia de datos se vea afectada. Es importante recalcar que el scheduler en el escenario planteado no reserva los recursos necesarios para cada usuario que cursa este tipo de tráfico. El efecto resultante para un escenario de carga significativa sobre un eNB es que ninguno de los UE obtiene una calidad de servicio tal que permita al usuario obtener buena calidad de experiencia. Este comportamiento no es totalmente esperable en la realidad cuando se utilice en la red otra implementación de scheduler que permita priorizar los distintos tipos de tráfico y considere un análisis minucioso de los requisitos mínimos de calidad de servicio exigidos sobre la red para cada servicio.

Debido al resultado de la simulación anterior se decidió simular un escenario con 50 usuarios, distribuidos en el mismo radio, pero utilizando solo los servicios de descarga de páginas web y descarga de archivos mediante el protocolo FTP.

- Porcentaje de usuarios realizando sesiones de descarga de páginas web: 60 %
- Porcentaje de usuarios realizando sesiones de descarga de archivos: 40 %

En este caso, para ambos tipos de tráfico, el 100 % de los usuarios percibió el servicio con buena calidad de experiencia, motivo por el cual es posible concluir que para esta configuración aún hay disponibilidad de recursos en la celda.

En base al resultado anterior se incrementó el número del total de usuarios a distribuir en 500 metros de cobertura, se simularon 70 usuarios de los cuales el 60 % realiza descargas de páginas web y el 40 % descarga de archivos. En este caso se obtuvo como resultado que tanto para servicios de Web Browsing como de FTP, el 97 % de los usuarios que cursó cada tipo de tráfico percibió el servicio con buena calidad de experiencia.

Finalmente, se realiza una última simulación extendiendo el radio de cobertura a 1000 metros, manteniendo la cantidad de usuarios: 70 UE de los cuales el 60 % realiza sesiones de Web Browsing y el 40 % descargas FTP. En este caso se constata que para el servicio de Web Browsing, el 59 % del total de 42 usuarios que se encuentran utilizando este servicio a través de la red LTE percibió el mismo con buena calidad de experiencia, mientras que en el caso de los usuarios que realizan descargas FTP, el 50 % de un total de 28 usuarios percibió el servicio con buena QoE. En base a estos resultados se concluye que el área de cobertura en el cual se distribuyen los usuarios resulta extensa para

este tipo de servicios concurrentes.

A partir del análisis de calidad de experiencia de los resultados presentados se puede comprobar que el factor crítico que afecta estos servicios es el tiempo de duración de la descarga cuando el nivel de carga de tráfico en el eNB se aproxima a sus límites de capacidad. A su vez, el scheduler no considera la configuración de los distintos EPS Bearers para priorizar los distintos tipos de tráfico, lo cual también repercute en el resultado obtenido.

9.5.1. Comparativa entre acceso fijo de banda ancha y LTE

Para estudiar la posibilidad de sustituir el servicio de acceso fijo ADSL en zonas suburbanas por LTE, se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones anteriores realizando un análisis comparativo entre ellas.

De los resultados anteriores se puede concluir que en ciertos escenarios de baja densidad de población es posible brindar un servicio de datos que permite obtener a los usuarios una calidad de experiencia buena, comparable a la que se obtendría con un servicio de ADSL convencional. De las simulaciones se obtiene que la desventaja al utilizar LTE es que al incrementar levemente la cantidad de usuarios en una celda, rápidamente se afecta significativamente la calidad de experiencia percibida por los usuarios finales, impidiendo hacer un uso satisfactorio de la red. Mientras que en ADSL los recursos utilizados para el acceso son exclusivos para el usuario, en LTE el recurso es compartido por lo cual no existe una disponibilidad totalmente dedicada al usuario.

Otra diferencia destacable es que el factor de la calidad del enlace en LTE depende de las condiciones de radio y en ADSL no existe dicha dependencia. De los resultados obtenidos se desprende otro aspecto importante con relación al radio de cobertura de la celda, si bien se obtuvieron buenos resultados en cuanto a la calidad de experiencia de los usuarios en radios de 500 metros, este valor es menor a lo esperable para una zona de baja densidad de población donde se esperan coberturas mayores. Este radio de cobertura fue el obtenido bajo la configuración de red indicada anteriormente, en la banda de frecuencias AWS (1710MHz UL-2110MHz DL). Utilizando frecuencias de operación más bajas es posible incrementar el radio de cobertura. En un entorno suburbano de Uruguay y con el radio de cobertura mencionado, sería difícil fijar la ubicación del nodo de manera que se brinde una buena calidad de servicio en las distancias que se manejan entre establecimientos rurales. Esto lleva a una alta distribución de nodos comparado con la densidad de población de la zona, por lo tanto se genera un alto costo por usuario.

Un punto a considerar es el tipo de modulación utilizado a nivel de capa física, lo cual es crítico en la capacidad que puede obtenerse en una celda LTE. La modulación varía según las condiciones de radio pudiendo utilizar 64 QAM, 16 QAM ó QPSK como se explica en 2.5.1. En un escenario sin obstáculos la modulación empleada es como la que se muestra en la figura 9.5.

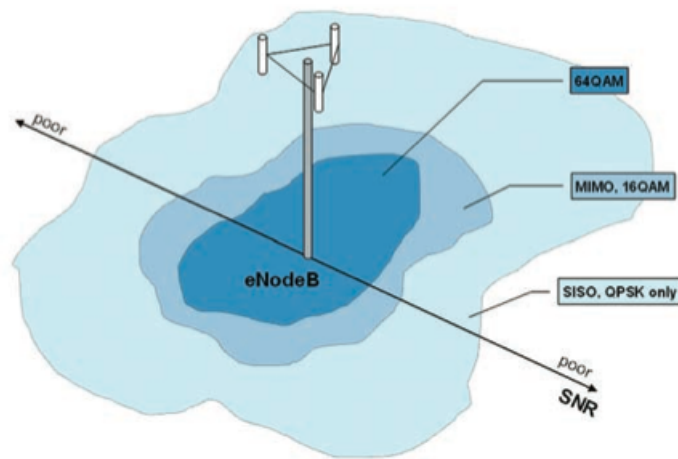


Figura 9.5: Esquema de modulaciones en LTE [28].

A modo de conclusión, en un entorno suburbano de baja densidad de población, generalmente existen usuarios ubicados próximos al límite de la cobertura de la celda, donde el esquema de modulación que se utiliza (QPSK) a esas distancias no permite obtener la máxima capacidad de la misma. Dependiendo de las características de la distribución de población y su densidad puede ser considerada la tecnología LTE como medio de acceso a un servicio de datos, teniendo en cuenta las consideraciones realizadas.

Conclusiones

Basados en el simulador de red LTE+EPC “LENA” se adaptó, modificó y se agregaron funcionalidades, logrando obtener una herramienta de simulación versátil, con flexibilidad para variar los parámetros más importantes de configuración de una red celular LTE, así como los parámetros relacionados con la demanda de los usuarios sobre la red y el método de propagación que se desea utilizar.

En conjunto con el escenario de simulación desarrollado, se creó un programa que permite analizar la calidad de experiencia con la que los usuarios perciben el servicio. De esta forma se realiza el análisis de “oferta y demanda” en una red celular LTE, determinando la capacidad alcanzable por la celda. Por un lado se tiene la configuración realizada sobre la red, que incluye: la frecuencia utilizada, el ancho de banda del canal, la técnica MIMO que se implementa, potencia de transmisión y otros, mientras que por otro lado se tiene la demanda de los usuarios sobre la red en función del número de usuarios que cursa cada tipo de tráfico, el número de sesiones y la tasa media de arribos para cada servicio.

Luego de un amplio estudio de los servicios más cursados por los usuarios en una red de datos se implementan en el simulador los modelos matemáticos correspondientes a cada tipo de tráfico que representan a cada servicio. Los servicios modelados, Voz sobre IP, Video Streaming, transferencia de archivos y navegación web, agregan al simulador una nueva funcionalidad que permite simular distintos escenarios de demanda de servicios sobre una red LTE.

Por otro lado también se agregó al simulador la posibilidad de utilizar un nuevo modelo de propagación basado en el modelo de propagación de espacio libre, aplicable en entornos suburbanos.

A lo largo del desarrollo del proyecto se detectaron distintos problemas que posee el simulador en el estado de desarrollo actual, corrigiendo alguno de ellos. Por un lado se corrigió que para el cálculo de la pérdida de camino se utilice la frecuencia correcta, para el canal de Downlink ó en Uplink. Por otro lado, se mejoró la eficiencia con la que se realiza la asignación de recursos de radio, el tiempo que un usuario debía espera para poder tener acceso al canal para transmitir estaba configurado en 1 segundo, lo cual es

ineficiente e inaceptable para esta tecnología. Al disminuir el valor configurándolo en 2ms se logra optimizar notoriamente los resultados.

Es importante destacar que para lograr el desarrollo de la herramienta de simulación se realizó un proceso de investigación que abarcó aspectos tanto de la tecnología LTE, así como aspectos relacionados a la percepción de los usuarios cuando utilizan determinado tipo de servicio. A su vez se estudiaron los requerimientos que se deben cumplir para que los usuarios tengan buena calidad de experiencia. Todo esto fue posible luego de un proceso de análisis de los distintos organismos que proporcionan normativas para regular el desarrollo de las tecnologías de comunicaciones y de las normas que establecen los diferentes criterios estándares para el estudio de calidad de servicio y calidad de experiencia.

Para contrastar algunos de los resultados obtenidos con el simulador y poder realizar el correcto análisis de la herramienta, se realizaron medidas de campo sobre una red LTE. Esto conllevó a familiarizarse con el software utilizado para realizar los llamados “Drive Test” así como a utilizar mapas para trazar el camino a seguir durante el procedimiento de mediciones, teniendo en cuenta la dirección de máxima ganancia de la antena. Al finalizar este procedimiento se verificó satisfactoriamente que los resultados obtenidos de las mediciones son comparables a los obtenidos mediante la herramienta desarrollada.

A partir de la herramienta implementada es posible analizar el desempeño de la red, dada su configuración y el escenario de demanda simulado.

Adicionalmente, se cumplió con el objetivo de evaluar la posibilidad de sustituir servicios de acceso fijo de banda ancha por LTE en zonas suburbanas. Se concluye que si bien los resultados obtenidos de throughput son altos y propios de las características de la tecnología LTE, éstos sólo son alcanzables a cortas distancias del eNB. Este comportamiento se debe a la modulación y codificación adaptativa que posee esta tecnología la cual depende, entre otros factores, de la distancia. A partir de los resultados obtenidos se evidencia que a distancias mayores del orden de 500 metros se utiliza el esquema de modulación más robusto pero como contrapartida, tiene un impacto significativo en el throughput máximo percibido. Se podría realizar un nuevo análisis utilizando una frecuencia de operación más baja con el fin de obtener mayor cobertura. Es importante destacar que las principales diferencias que posee nuestro modelo de red, es que se utiliza como scheduler el Proportional Fair el cual no prioriza tráfico, esto repercute en los resultados de calidad de experiencia obtenidos. Por otro lado, un factor que influye en los resultados obtenidos es que la técnica de transmisión implementada en el simulador en el sentido de Uplink es SISO, técnica no utilizada en una red real. Técnicas de transmisión en Uplink donde el UE transmite con una antena y el eNB recibe con cuatro, permiten mejorar la cobertura en el sentido ascendente de la comunicación, sin dejar de mencionar que utilizar bandas de frecuencias bajas siempre permite extender el radio de cobertura de la radio base.

Como conclusión final, se destaca que la herramienta desarrollada puede ser utilizada para realizar la planificación de una red LTE, obteniendo como resultado la cantidad de usuarios que perciben los diferentes servicios demandados con buena calidad de experiencia. Se debe tener en cuenta las limitaciones impuestas por el simulador las

cuales se explicaron anteriormente, sobre todo en sentido Uplink. Queda a criterio del usuario de la herramienta poder realizar el balance entre la oferta y demanda en la red según sus objetivos.

10.0.2. Lineamiento de trabajo a futuro

En el proceso final de desarrollo de la herramienta, se identifican algunos aspectos donde se pueden realizar contribuciones al trabajo elaborado de forma de optimizar la herramienta.

Uno de los problemas presentados es el modelo de asignación de recursos que implementa el simulador en sentido Uplink. Actualmente el algoritmo de scheduler es el Round Robin sin poder utilizar ningún otro algoritmo en el sentido ascendente, limitando este flujo a las características del mismo. A su vez este scheduler no considera las condiciones de radio de los usuarios asignando los recursos a todos los usuarios por igual. Un aporte significativo a esta herramienta consiste en el desarrollo de otro tipo de scheduler para la asignación de recursos en Uplink, como por ejemplo el algoritmo de scheduler Proportional Fair, el cual permite obtener mejores resultados en las simulaciones. De esta manera la asignación de recursos no afectaría a todos los usuarios, logrando un incremento en los porcentajes de satisfacción de calidad de experiencia. El nuevo scheduler debería tener en cuenta la prioridad establecida en las EPS Bearer según el tipo de tráfico cursado.

Otro aspecto a mejorar es minimizar los tiempos de duración de las simulaciones. El análisis a futuro debería evaluar dónde se consume la mayoría de los recursos utilizados y poder realizar una optimización de los mismos para disminuir los tiempos de simulación. Esto permite una mejora en la herramienta, haciéndola más eficiente en cuanto a la duración de las simulaciones.

Por otro lado se puede realizar un estudio más complejo de los escenarios de simulación, ampliando las hipótesis consideradas, permitiendo implementar movilidad a los usuarios así como también considerar interferencia de celdas vecinas simulando pequeños grupos de nodos ("clusters").

Un último aspecto en el cual se puede avanzar, es en la creación de una interfaz gráfica que permita la interacción fácil y efectiva con el usuario de la herramienta implementada. Se puede elaborar una interfaz amigable en donde se ingresen como parámetros la configuración de la red según las necesidades del usuario y del escenario que se considera. Esta interfaz podría presentar los resultados obtenidos en archivos con las estadísticas de las simulaciones planteadas, almacenándolas en una base de datos para un posterior análisis.

10.0.3. Comentarios finales

Este proyecto realizó un estudio de una nueva tecnología de redes celulares que establece una gran diferencia con las tecnologías anteriores debido a que se deja de lado la arquitectura de circuitos pasando a una comunicación totalmente orientada a paquetes ("Full IP"). LTE recién comienza a instalarse en Uruguay, y se encuentra en un proceso

de desarrollo en el resto del mundo.

A lo largo del desarrollo de este proyecto nos enfrentamos con varios problemas que felizmente debido al gran esfuerzo y dedicación realizado se pudo cumplir con los diferentes objetivos planteados inicialmente. Se logró obtener la herramienta que cumpliera con las características esperadas así como también, luego de pasar por varios obstáculos durante su desarrollo, poder sentir una gran satisfacción grupal al ver cumplidos los objetivos.

Como grupo de trabajo creemos que este proyecto permite dar comienzo a una nueva herramienta donde se puede evolucionar en varios aspectos mencionados en este último capítulo, siendo el pilar del camino a seguir dentro de una nueva tecnología donde la calidad de experiencia del usuario juega un rol primordial.

Bibliografía

- [1] Diapositivas del curso Redes de Acceso, año 2011. UDELAR, Facultad de Ingeniería. Uruguay .
- [2] <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/lte-long-term-evolution/3g-lte-basics.php>. Marzo 2012 .
- [3] Ronit Nossenson, Long-Term Evolution Network Architecture. White Paper IEEE.
- [4] Robert Bestak, Evolution of Mobile Networks. Czech Technical University, Faculty of Electrical Engineering.
- [5] VV.AA. Coordinador: Ramón Agustí Comes. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles, Vodafone. ISBN: 84-934740-4-5.
- [6] Farooq Khan, LTE for Mobile Broadband. ISBN-13 978-0-511-51666-5 año 2009, eBook.
- [7] Dedicado Telecomunicaciones, <http://www.dedicado.com.uy>. Marzo 2012.
- [8] Antel, <http://www.antel.com.uy>. Marzo 2012.
- [9] <http://www.gsacom.com>, Marzo 2012.
- [10] Technical Report TR126: Triple play Services Quality of Experience Requirements. DSL Forum, 13 Diciembre 2006.
- [11] Hassan, Jean-Marie García y Olivier Brun, Generic Modeling of Multimedia Traffic Sources. Laboratory for Analysis and Architecture of Systems LAAS-CNRS.
- [12] Shuang Deng, Traffic Characteristics of Packet Voice. GTE Laboratories, Inc.
- [13] Recomendación UIT-T G.1010, Categorías de calidad de servicio para los usuarios de extremo de servicios multimedia, Noviembre 2001.
- [14] Recomendación UIT-T G.107, The E-Model, a computational model for use in transmission planning, Mayo 2000.
- [15] IEEE P 802.20, Traffic Models for IEEE 802.20 MBWA System Simulations.
- [16] Documentación de Lena - <http://lena.cttc.es/manual/lte-design.html>
- [17] Recomendación de la 3GPP 23.203 versión 8.11.0, sección 6.1.7.2. Octubre 2010.
- [18] Recomendación de la 3GPP 36.101 versión 11.1.0, sección 5.7.3. Junio 2012.

- [19] Recomendación de la 3GPP 36.101 versión 11.1.0, sección 5.5. Junio 2012.
- [20] Recomendación de la 3GPP 36.101 versión 11.1.0, sección 6. Junio 2012.
- [21] 3GPP2 C.R1002-0 Version 1.0 Date: December 10, 2004.
- [22] 3GPP TS 36.213 version 8.8.0 Release 8, Octubre 2009.
- [23] Nicola Baldo, Marco Miozzo, Manuel Requena-Esteso, Jaume Nin-Guerrero. An Open Source Product-Oriented LTE Network Simulator based on ns-3. Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC).
- [24] Características de una antena LTE utilizada en la banda AWS, http://www.rfsworld.com/userfiles/pdf/data_sheet_apxv18-206516h-c.pdf. 04/12/2012.
- [25] 3GPP TR 25.912 versión 9.0.0 Release 9, Octubre 2009.
- [26] <http://support.google.com/youtube/bin/static.py?hl=en&page=guide.cs&guide=1728585&topic=1731151&answer=1723080> (18 de Octubre 2012)
- [27] http://www.facetcorp.com/pdf/what_voip_requires_from_a_data_network.pdf (18 de Octubre 2012)
- [28] http://www.redeweb.com/_txt/671/82.pdf (26 de Octubre 2012)

Apéndices

Instalación de LENA y uso de la herramienta desarrollada

Este anexo brinda la información necesaria para realizar la correcta instalación y utilización de la herramienta desarrollada. En los siguientes pasos se explica el procedimiento para lograr el funcionamiento de la misma bajo una plataforma UNIX.

A.1. Pasos de la instalación del simulador

El proceso de instalación de esta herramienta se realiza de la siguiente manera:

- En una ventana de terminal ejecutar los siguientes comandos para instalar el compilador G++ y la herramienta Mercurial.

```
> sudo apt-get install mercurial
> sudo apt-get install g++
```

- Crear un directorio donde se desea instalar la herramienta. Copiar el contenido de la carpeta “InstalacionSimulador” incluida en el CD que acompaña este documento.
- Dentro de la carpeta previamente creada ejecutar los siguientes comandos:

```
> unzip LENA-LTE-EPC-Network-Simulator—db6d857a07f0.zip
> cd LENA-LTE-EPC-Network-Simulator—db6d857a07f0/
> ./waf configure
```

Estos comandos permiten configurar el simulador de red utilizado, LENA.

- A continuación se instalan las aplicaciones desarrolladas para el funcionamiento de la herramienta LTest. Ejecutar los siguientes comandos:

```
> cd ..
> tar -xvf LTest.tar
```

Este comando integra al simulador las clases desarrolladas que implementan los modelos utilizados de tráfico Video Streaming y Web Traffic junto con el modelo de propagación de Friis Modificado por un parámetro γ configurable.

Las clases que se importan con este comando son:

- En la carpeta lena/src/applications/model:
bulk-send-application-webtraffic.cc
bulk-send-application-webtraffic.h
udp-client-VS.cc
udp-client-VS.h
- En la carpeta lena/src/applications/helper:
bulk-send-helper-webtraffic.cc
bulk-send-helper-webtraffic.h
udp-client-server-helper-VS.cc
udp-client-server-helper-VS.h
- En la carpeta lena/src/applications se actualiza el archivo wscript.
- En la carpeta lena/src/propagation/model:
propagation-loss-model.cc
propagation-loss-model.h
- En la carpeta lena/src/spectrum/model:
friis-spectrum-propagation-loss.cc
friis-spectrum-propagation-loss.h
- En la carpeta lena/src/lte/model:
pf-ff-mac-scheduler.cc
- Finalmente resta compilar para luego poder ejecutar la aplicación.

```
> ./waf
```

Luego de realizado el procedimiento anterior, se culmina el proceso de instalación estando en condiciones de hacer uso de la herramienta LTest.

A.2. Uso de la herramienta desarrollada

Para comenzar el uso de la herramienta es necesario la ejecución del siguiente comando donde se ingresan los parámetros de entrada que permiten generar el escenario de simulación deseado.

```
> ./waf --run LTest
```

Luego de ingresados los parámetros de entrada comienza el proceso de simulación y una vez finalizado se generan archivos de salida los cuales son accesibles por el operador en el directorio donde se encuentra instalado el programa. Adicionalmente estos archivos son utilizados por el programa QoE.cc para analizar la calidad de experiencia percibida por los usuarios.

Se debe ejecutar el programa QoE para realizar este estudio, lo cual es posible mediante la ejecución del siguiente comando:

```
> ./waf --run QoE
```

Ejemplos de simulaciones realizadas

B.1. Simulación de VoIP

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una simulación del servicio VoIP.

Parámetros de entrada al programa:

```
Ingresar radio de cobertura(m) :
->500
Ingresar potencia del UE(dBm) :
->23
Ingresar potencia del eNB(dBm)+ ganacia de antena (dBi) :
->66
Seleccione el ancho de banda:
    1 – Ancho de banda:1,4MHz
    2 – Ancho de banda:3MHz
    3 – Ancho de banda:5MHz
    4 – Ancho de banda:10MHz
    5 – Ancho de banda:15MHz
    6 – Ancho de banda:20MHz
->6
Seleccione la banda de operación según Tabla 5.7.3–1: E-UTRA channel numbers
de norma 3GPP 36.101:
->4
Seleccione el Scheduler:
    1 – RoundRobinScheduler
    2 – ProportionalFairScheduler
->2
Seleccione técnica MIMO para downlink:
    0 –SISO
    1 –MIMO Tx Diversity
    2 –MIMO Spatial Multiplexity Open Loop
->2
Seleccione el modelo de propagación:
    1 –Friis
    2 –Friis modificado
    3 –Cost231
->2
```

Ingrese valor de parámetro Gamma de decaimiento con la distancia
->2.7

Ingresar cantidad Total de Ue: 50

Ingresar porcentaje de Ue realizando Voip:100

Ingresar cantidad de llamadas que realiza cada Ue:1

Ingresar tasa media de arribo de llamadas:1

Ingresar tasa media de duración de llamadas:30

Cantidad de ue haciendo Voip: 50

Numero de llamadas por Ue: 1

.....//.....

Ingresar porcentaje de Ue realizando WebTraffic:0

Ingresar tasa media de arribo de sesiones de Web Traffic:0

Ingresar numero de paginas web visitadas por usuario:0

Cantidad de Ue haciendo WebTraffic: 0

.....//.....

Ingresar porcentaje de Ue realizando FTP:0

Ingresar numero de sesiones FTP por usuario:0

Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones FTP:0

Cantidad de Ue haciendo FTP: 0

Cantidad de sesiones de FTP: 0

.....//.....

Ingresar porcentaje de Ue realizando Video Streaming:0

Ingresar numero de sesiones de VS por usuario:0

Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones VS:0

Cantidad de Ue haciendo VS: 0

Cantidad de sesiones de VS: 0

.....//.....

Resultados de la simulación:

Se presentan los resultados de alguno de los usuarios que utilizan este tipo de tráfico.

```
Flow ID1: 1 Src Addr 7.0.0.29 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 327 RxPackets= 326
Throughput(Mbps) 0.0103396 Jitter(s)= 0.0066381 MeanDelay de Paquetes(s)=
0.0187066 Paquetes perdidos= 1
Flow ID1: 2 Src Addr 7.0.0.22 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 730 RxPackets= 725
Throughput(Mbps) 0.00892289 Jitter(s)= 0.00777806 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.0208889 Paquetes perdidos= 5
Flow ID1: 3 Src Addr 7.0.0.2 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 344 RxPackets= 342
Throughput(Mbps) 0.00791561 Jitter(s)= 0.00718448 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.0209426 Paquetes perdidos= 2
Flow ID1: 4 Src Addr 7.0.0.51 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 344 RxPackets= 337
Throughput(Mbps) 0.0136464 Jitter(s)= 0.00782735 MeanDelay de Paquetes(s)=
0.0206178 Paquetes perdidos= 7
Flow ID1: 5 Src Addr 1.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.51 TxPackets= 267 RxPackets= 267
Throughput(Mbps) 0.0109701 Jitter(s)= 0.000189487 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.00376003 Paquetes perdidos= 0
...
Flow ID1: 92 Src Addr 7.0.0.18 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 477 RxPackets= 470
Throughput(Mbps) 0.00965135 Jitter(s)= 0.00891996 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.0238213 Paquetes perdidos= 7
Flow ID1: 93 Src Addr 7.0.0.30 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 219 RxPackets= 215
Throughput(Mbps) 0.00934393 Jitter(s)= 0.00780482 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.0222619 Paquetes perdidos= 4
Flow ID1: 94 Src Addr 1.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.4 TxPackets= 71 RxPackets= 71
Throughput(Mbps) 0.00402383 Jitter(s)= 0.00027026 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.00417575 Paquetes perdidos= 0
Flow ID1: 95 Src Addr 7.0.0.12 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 29 RxPackets= 29
Throughput(Mbps) 0.0282027 Jitter(s)= 0.00510715 MeanDelay de Paquetes(s)=
0.0170166 Paquetes perdidos= 0
```

Flow ID1: 96 Src Addr 1.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.42 TxPackets= 222 RxPackets= 222
Throughput(Mbps) 0.00887094 Jitter(s)= 0.000601581 MeanDelay de Paquetes(s)
)= 0.00477078 Paquetes perdidos= 0
Flow ID1: 97 Src Addr 7.0.0.4 Dst Addr 1.0.0.2 TxPackets= 85 RxPackets= 84
Throughput(Mbps) 0.00498376 Jitter(s)= 0.00563293 MeanDelay de Paquetes(s)
= 0.0205917 Paquetes perdidos= 1
Flow ID1: 98 Src Addr 1.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.46 TxPackets= 747 RxPackets= 747
Throughput(Mbps) 0.011034 Jitter(s)= 0.000135641 MeanDelay de Paquetes(s)=
0.00387735 Paquetes perdidos= 0

<< VoIP >>

El usuario 7.0.0.51 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.11 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.34 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.2 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010

...

No se cumple el umbral de PLR para el usuario 7.0.0.26

El usuario 7.0.0.26 percibió el servicio VoIP con mala calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.41 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.29 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.13 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.10 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010

...

No se cumple el umbral de PLR para el usuario 7.0.0.28

El usuario 7.0.0.28 percibió el servicio VoIP con mala calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.37 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.16 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.21 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.8 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.32 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.30 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.12 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.47 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.18 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.4 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.42 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.46 percibió el servicio VoIP con buena calidad de experiencia

de acuerdo a la norma G1010
→Un 97por ciento de un total de 48 usuarios que realizan VoIP tuvieron buena calidad de experiencia 2 usuarios tuvieron mala calidad de experiencia

B.2. Simulación de Video Streaming

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una simulación del servicio de video streaming.

Parámetros de entrada al programa:

```
Ingresar radio de cobertura(m) :
→2000
Ingresar potencia del UE(dBm) :
→23
Ingresar potencia del eNB(dBm) + ganacia de antena (dBi) :
→66
Seleccione el ancho de banda:
    1 – Ancho de banda:1,4MHz
    2 – Ancho de banda:3MHz
    3 – Ancho de banda:5MHz
    4 – Ancho de banda:10MHz
    5 – Ancho de banda:15MHz
    6 – Ancho de banda:20MHz
→6
Seleccione la banda de operación según Tabla 5.7.3–1: E-UTRA channel numbers
de norma 3GPP 36.101:
→4
Seleccione el Scheduler:
    1 – RoundRobinScheduler
    2 – ProportionalFairScheduler
→2
Seleccione técnica MIMO para downlink:
    0 –SISO
    1 –MIMO Tx Diversity
    2 –MIMO Spatial Multiplexity Open Loop
→2
Seleccione el modelo de propagación:
    1 –Friis
    2 –Friis modificado
    3 –Cost231
→2
Ingrese valor de parámetro Gamma de decaimiento con la distancia
→2.7
Ingresar cantidad Total de Ue: 200
Ingresar porcentaje de Ue realizando Voip:0
Ingresar cantidad de llamadas que realiza cada Ue:0
Ingresar tasa media de arribo de llamadas:0
Ingresar tasa media de duración de llamadas:0
Cantidad de ue haciendo Voip: 0
Numero de llamadas por Ue: 0
..... // .....
Ingresar porcentaje de Ue realizando WebTraffic:0
Ingresar tasa media de arribo de sesiones de Web Traffic:0
Ingresar numero de paginas web visitadas por usuario:0
Cantidad de Ue haciendo WebTraffic: 0
```



```

.....//.....
Ingresar porcentaje de Ue realizando FTP:0
Ingresar numero de sesiones FTP por usuario:0
Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones FTP:0
Cantidad de Ue haciendo FTP: 0
Cantidad de sesiones de FTP: 0
.....//.....
Ingresar porcentaje de Ue realizando Video Streaming:100
Ingresar numero de sesiones de VS por usuario:1
Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones VS:1
Cantidad de Ue haciendo VS: 200
Cantidad de sesiones de VS: 1
.....//.....

```

Resultados de la simulación:

Se muestran los resultados obtenidos seleccionando alguno de los 200 usuarios.

```

Flow ID3: 121 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.109 TxPackets= 103440 RxPackets=
103440 Throughput(Mbps)= 0.621469 ThroughputSalida(Mbps)= 0.621468 Jitter(
s)= 184.262 Mean Delay(s)= 0.00683538 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 226.727
Flow ID3: 122 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.94 TxPackets= 126240 RxPackets=
126240 Throughput(Mbps)= 0.621533 ThroughputSalida(Mbps)= 0.621529 Jitter(
s)= 190.694 Mean Delay(s)= 0.00614223 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 275.906
Flow ID3: 123 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.60 TxPackets= 127680 RxPackets=
127680 Throughput(Mbps)= 0.617912 ThroughputSalida(Mbps)= 0.617912 Jitter(
s)= 190.432 Mean Delay(s)= 0.00610835 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 280.748
Flow ID3: 124 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.97 TxPackets= 22560 RxPackets=
22560 Throughput(Mbps)= 0.62615 ThroughputSalida(Mbps)= 0.626189 Jitter(s)
= 61.5384 Mean Delay(s)= 0.0112108 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de Descarga
= 49.269
Flow ID3: 125 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.149 TxPackets= 5040 RxPackets=
5040 Throughput(Mbps)= 0.621487 ThroughputSalida(Mbps)= 0.621627 Jitter(s)
= 14.2388 Mean Delay(s)= 0.012598 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de Descarga=
10.884
Flow ID3: 126 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.112 TxPackets= 3840 RxPackets=
3840 Throughput(Mbps)= 0.639516 ThroughputSalida(Mbps)= 0.64084 Jitter(s)=
10.8135 Mean Delay(s)= 0.0141586 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de Descarga=
8.316
Flow ID3: 127 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.121 TxPackets= 127440 RxPackets=
127440 Throughput(Mbps)= 0.624601 ThroughputSalida(Mbps)= 0.624598 Jitter
(s)= 190.888 Mean Delay(s)= 0.00621759 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 278.373
Flow ID3: 128 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.3 TxPackets= 120960 RxPackets=
120960 Throughput(Mbps)= 0.622878 ThroughputSalida(Mbps)= 0.622871 Jitter(
s)= 189.85 Mean Delay(s)= 0.00629952 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 264.885
Flow ID3: 129 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.134 TxPackets= 55440 RxPackets=
55440 Throughput(Mbps)= 0.622962 ThroughputSalida(Mbps)= 0.62297 Jitter(s)
= 130.634 Mean Delay(s)= 0.00855947 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 121.42
Flow ID3: 130 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.9 TxPackets= 110880 RxPackets=
110880 Throughput(Mbps)= 0.624372 ThroughputSalida(Mbps)= 0.62437 Jitter(s
)= 187.601 Mean Delay(s)= 0.00678237 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de
Descarga= 242.245
Flow ID3: 131 Src Addr 4.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.10 TxPackets= 72720 RxPackets=

```

72720 Throughput(Mbps)= 0.619497 ThroughputSalida(Mbps)= 0.619482 Jitter(s)= 157.758 Mean Delay(s)= 0.00780556 Paquetes perdidos= 0 Tiempo de Descarga= 159.87

...

<<<Video Streaming>>>

El usuario 7.0.0.184 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.23 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.59 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

Atención: El usuario 7.0.0.191 no cumple el umbral de Throughput

El usuario 7.0.0.191 percibió el servicio VS con mala calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.57 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.15 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.171 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.122 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

Atención: El usuario 7.0.0.112 no cumple el umbral de Throughput

El usuario 7.0.0.112 percibió el servicio VS con mala calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

El usuario 7.0.0.138 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.96 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

Atención: El usuario 7.0.0.64 no cumple el umbral de Throughput

El usuario 7.0.0.64 percibió el servicio VS con mala calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

El usuario 7.0.0.28 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.21 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.55 percibió el servicio VS con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

→Un 98 por ciento de un total de 200 usuarios que realizan VS tuvieron buena calidad de experiencia 3 usuarios tuvieron mala calidad de experiencia

B.3. Simulación de tráfico Web Browsing

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una simulación de tráfico web browsing.

Parámetros de entrada al programa:

```
Ingresar radio de cobertura(m) :
->700
Ingresar potencia del UE(dBm) :
->23
Ingresar potencia del eNB(dBm)+ ganacia de antena (dBi) :
->66
Seleccione el ancho de banda:
    1 – Ancho de banda:1,4MHz
    2 – Ancho de banda:3MHz
    3 – Ancho de banda:5MHz
    4 – Ancho de banda:10MHz
    5 – Ancho de banda:15MHz
    6 – Ancho de banda:20MHz
->6
Seleccione la banda de operación según Tabla 5.7.3–1: E-UTRA channel numbers
de norma 3GPP 36.101:
->4
Seleccione el Scheduler:
    1 – RoundRobinScheduler
    2 – ProportionalFairScheduler
->2
Seleccione técnica MIMO para downlink:
    0 –SISO
    1 –MIMO Tx Diversity
    2 –MIMO Spatial Multiplexity Open Loop
->2
Seleccione el modelo de propagación:
    1 –Friis
    2 –Friis modificado
    3 –Cost231
->2
Ingrese valor de parámetro Gamma de decaimiento con la distancia
->2.7
Ingresar cantidad Total de Ue: 70
Ingresar porcentaje de Ue realizando Voip:0
Ingresar cantidad de llamadas que realiza cada Ue:0
Ingresar tasa media de arribo de llamadas:0
Ingresar tasa media de duración de llamadas:0
Cantidad de ue haciendo Voip: 0
Numero de llamadas por Ue: 0
..... //.....
Ingresar porcentaje de Ue realizando WebTraffic:100
Ingresar tasa media de arribo de sesiones de Web Traffic:1
Ingresar numero de paginas web visitadas por usuario:1
Cantidad de Ue haciendo WebTraffic: 70
..... //.....
Ingresar porcentaje de Ue realizando FTP:0
Ingresar numero de sesiones FTP por usuario:0
Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones FTP:0
Cantidad de Ue haciendo FTP: 0
```

Cantidad de sesiones de FTP: 0
//.....
 Ingresar porcentaje de Ue realizando Video Streaming:0
 Ingresar numero de sesiones de VS por usuario:0
 Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones VS:0
 Cantidad de Ue haciendo VS: 0
 Cantidad de sesiones de VS: 0

Algunos Resultados de la simulación:

Flow ID2: 1 Src Addr 2.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.5 TxPackets= 123 RxPackets= 123
 TxBytes= 69667 RxBytes= 69667 Throughput(Mbps)= 1.09818 Jitter(s)=
 0.0436768 Mean Delay(s)= 0.003963 Paquetes perdidos= 0 Tiempo Transmission
 Promedio= 0.484

Flow ID2: 2 Src Addr 7.0.0.5 Dst Addr 2.0.0.2 TxPackets= 62 RxPackets= 62
 TxBytes= 2480 RxBytes= 2480 Throughput(Mbps)= 0.0288428 Jitter(s)=
 0.583999 Mean Delay(s)= 0.0940416 Paquetes perdidos= 0 Tiempo Transmission
 Promedio= 0.656

Flow ID2: 3 Src Addr 2.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.17 TxPackets= 23 RxPackets= 23
 TxBytes= 10771 RxBytes= 10771 Throughput(Mbps)= 0.0920226 Jitter(s)=
 0.0119431 Mean Delay(s)= 0.00495689 Paquetes perdidos= 0 Tiempo
 Transmission Promedio= 0.893

Flow ID2: 4 Src Addr 7.0.0.17 Dst Addr 2.0.0.2 TxPackets= 13 RxPackets= 13
 TxBytes= 520 RxBytes= 520 Throughput(Mbps)= 0.00445262 Jitter(s)= 0.092
 Mean Delay(s)= 0.0174671 Paquetes perdidos= 0 Tiempo Transmission Promedio=
 0.891

...

Flow ID2: 137 Src Addr 2.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.38 TxPackets= 53 RxPackets= 53
 TxBytes= 29212 RxBytes= 29212 Throughput(Mbps)= 0.404483 Jitter(s)=
 0.00067147 Mean Delay(s)= 0.00308394 Paquetes perdidos= 0 Tiempo
 Transmission Promedio= 0.551

Flow ID2: 138 Src Addr 2.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.35 TxPackets= 5 RxPackets= 5
 TxBytes= 1042 RxBytes= 1042 Throughput(Mbps)= 0.0679473 Jitter(s)=
 0.00121491 Mean Delay(s)= 0.00331434 Paquetes perdidos= 0 Tiempo
 Transmission Promedio= 0.117

Flow ID2: 139 Src Addr 7.0.0.38 Dst Addr 2.0.0.2 TxPackets= 27 RxPackets= 27
 TxBytes= 1080 RxBytes= 1080 Throughput(Mbps)= 0.014061 Jitter(s)=
 0.0810012 Mean Delay(s)= 0.074151 Paquetes perdidos= 0 Tiempo Transmission
 Promedio= 0.586

Flow ID2: 140 Src Addr 7.0.0.35 Dst Addr 2.0.0.2 TxPackets= 3 RxPackets= 3
 TxBytes= 120 RxBytes= 120 Throughput(Mbps)= 0.00832298 Jitter(s)= 0.019
 Mean Delay(s)= 0.0395953 Paquetes perdidos= 0 Tiempo Transmission Promedio=
 0.11

<<<Web Traffic>>>

El usuario 7.0.0.5 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de
 experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.17 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de
 experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.14 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de
 experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.33 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de
 experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.53 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de
 experiencia de acuerdo a la norma G1010

...

El usuario 7.0.0.62 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de
 experiencia de acuerdo a la norma G1010

El usuario 7.0.0.56 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de

experiencia de acuerdo a la norma G1010
 El usuario 7.0.0.40 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010
 El usuario 7.0.0.44 percibió el servicio WebTraffic con calidad de experiencia aceptable de acuerdo a la norma G1010
 El usuario 7.0.0.47 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010
 El usuario 7.0.0.38 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010
 El usuario 7.0.0.35 percibió el servicio WebTraffic con buena calidad de experiencia de acuerdo a la norma G1010
 →Un 100por ciento de un total de 70 usuarios que realizan WebBrowsing tuvieron buena calidad de experiencia 0 usuarios tuvieron mala calidad de experiencia

B.4. Simulación de tráfico FTP

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una simulación de tráfico FTP.

Parámetros de entrada al programa:

Ingresar radio de cobertura(m):
 →1000
 Ingresar potencia del UE(dBm):
 →23
 Ingresar potencia del eNB(dBm)+ ganacia de antena (dBi):
 →66
 Seleccione el ancho de banda:
 1 – Ancho de banda:1,4MHz
 2 – Ancho de banda:3MHz
 3 – Ancho de banda:5MHz
 4 – Ancho de banda:10MHz
 5 – Ancho de banda:15MHz
 6 – Ancho de banda:20MHz
 →6
 Seleccione la banda de operación según Tabla 5.7.3–1: E-UTRA channel numbers de norma 3GPP 36.101:
 →4
 Seleccione el Scheduler:
 1 – RoundRobinScheduler
 2 – ProportionalFairScheduler
 →2
 Seleccione técnica MIMO para downlink:
 0 –SISO
 1 –MIMO Tx Diversity
 2 –MIMO Spatial Multiplexity Open Loop
 →2
 Seleccione el modelo de propagación:
 1 –Friis
 2 –Friis modificado
 3 –Cost231
 →2
 Ingrese valor de parámetro Gamma de decaimiento con la distancia
 →2.7

Ingresar cantidad Total de Ue: 60
 Ingresar porcentaje de Ue realizando Voip:0
 Ingresar cantidad de llamadas que realiza cada Ue:0
 Ingresar tasa media de arribo de llamadas:0
 Ingresar tasa media de duración de llamadas:0
 Cantidad de ue haciendo Voip: 0
 Numero de llamadas por Ue: 0
//.....
 Ingresar porcentaje de Ue realizando WebTraffic:0
 Ingresar tasa media de arribo de sesiones de Web Traffic:0
 Ingresar numero de paginas web visitadas por usuario:0
 Cantidad de Ue haciendo WebTraffic: 0
//.....
 Ingresar porcentaje de Ue realizando FTP:100
 Ingresar numero de sesiones FTP por usuario:1
 Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones FTP:1
 Cantidad de Ue haciendo FTP: 100
 Cantidad de sesiones de FTP: 1
//.....
 Ingresar porcentaje de Ue realizando Video Streaming:0
 Ingresar numero de sesiones de VS por usuario:0
 Ingresar parametro lambda de arribos de sesiones VS:0
 Cantidad de Ue haciendo VS: 0
 Cantidad de sesiones de VS: 0

Algunos resultados de la simulación:

Flow ID3: 1 Src Addr 3.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.4 TxPackets= 4322 Rx Packets= 4302
 Throughput(kbps)= 1180.41 Jitter(s)= 8.47625 Mean Delay(s)= 0.0124697
 Paquetes perdidos= 20 Tiempo de Descarga= 16.387 TxBytes= 2.48748e+06
 RxBytes= 2.47596e+06
 Flow ID3: 2 Src Addr 7.0.0.4 Dst Addr 3.0.0.2 TxPackets= 2221 Rx Packets= 1816
 Throughput(kbps)= 34.6671 Jitter(s)= 20.356 Mean Delay(s)= 0.0867465
 Paquetes perdidos= 405 Tiempo de Descarga= 16.37 TxBytes= 88840 RxBytes= 72640
 Flow ID3: 3 Src Addr 3.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.55 TxPackets= 3993 Rx Packets= 3985
 Throughput(kbps)= 1390.42 Jitter(s)= 9.87362 Mean Delay(s)= 0.0151309
 Paquetes perdidos= 8 Tiempo de Descarga= 12.888 TxBytes= 2.29833e+06
 RxBytes= 2.29372e+06
 Flow ID3: 4 Src Addr 7.0.0.55 Dst Addr 3.0.0.2 TxPackets= 2092 Rx Packets= 1818
 Throughput(kbps)= 44.2362 Jitter(s)= 16.641 Mean Delay(s)= 0.0797204
 Paquetes perdidos= 274 Tiempo de Descarga= 12.843 TxBytes= 83680 RxBytes= 72720
 Flow ID3: 10 Src Addr 7.0.0.7 Dst Addr 3.0.0.2 TxPackets= 1811 Rx Packets= 1457
 Throughput(kbps)= 24.8791 Jitter(s)= 18.88 Mean Delay(s)= 0.0890015
 Paquetes perdidos= 354 Tiempo de Descarga= 18.301 TxBytes= 72440 RxBytes= 58280
 ...
 Flow ID3: 116 Src Addr 7.0.0.17 Dst Addr 3.0.0.2 TxPackets= 2453 Rx Packets= 1503
 Throughput(kbps)= 37.6322 Jitter(s)= 17.301 Mean Delay(s)= 0.261643
 Paquetes perdidos= 950 Tiempo de Descarga= 12.481 TxBytes= 98120 RxBytes= 60120
 Flow ID3: 117 Src Addr 3.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.22 TxPackets= 5837 Rx Packets= 5834
 Throughput(kbps)= 868.43 Jitter(s)= 11.8068 Mean Delay(s)= 0.0104214
 Paquetes perdidos= 3 Tiempo de Descarga= 30.212 TxBytes= 3.36006e+06
 RxBytes= 3.35834e+06
 Flow ID3: 118 Src Addr 7.0.0.22 Dst Addr 3.0.0.2 TxPackets= 2982 Rx Packets= 2851
 Throughput(kbps)= 29.5169 Jitter(s)= 31.586 Mean Delay(s)= 0.152059
 Paquetes perdidos= 131 Tiempo de Descarga= 30.184 TxBytes= 119280 RxBytes=

```

114040
Flow ID3: 119 Src Addr 3.0.0.2 Dst Addr 7.0.0.56 TxPackets= 2264 Rx Packets=
2264 Throughput(kbps)= 686.038 Jitter(s)= 7.29413 Mean Delay(s)= 0.0150062
Paquetes perdidos= 0 Tiempo de Descarga= 14.828 TxBytes= 1.30209e+06
RxBytes= 1.30209e+06
Flow ID3: 120 Src Addr 7.0.0.56 Dst Addr 3.0.0.2 TxPackets= 1141 Rx Packets=
1097 Throughput(kbps)= 23.163 Jitter(s)= 13.696 Mean Delay(s)= 0.0718268
Paquetes perdidos= 44 Tiempo de Descarga= 14.8 TxBytes= 45640 RxBytes=
43880

<<<FTP>>>
El usuario 7.0.0.4 percibió el servicio FTP con calidad de experiencia
aceptable de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.55 percibió el servicio FTP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
...
El usuario 7.0.0.54 no cumple el umbral de PLR
El usuario 7.0.0.54 percibió el servicio FTP con mala calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.16 percibió el servicio FTP con calidad de experiencia
aceptable de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.12 percibió el servicio FTP con calidad de experiencia
aceptable de acuerdo a la norma G1010
...
El usuario 7.0.0.22 percibió el servicio FTP con calidad de experiencia
aceptable de acuerdo a la norma G1010
El usuario 7.0.0.56 percibió el servicio FTP con buena calidad de experiencia
de acuerdo a la norma G1010
->Un 95por ciento de un total de 60 usuarios que realizan FTP tuvieron buena
calidad de experiencia 3 usuarios tuvieron mala calidad de experiencia

```

Los resultados completos de las simulaciones presentadas en este documento se pueden consultar en el CD que se adjunta bajo el directorio "Simulaciones". En el mismo se encuentran las diferentes simulaciones realizadas en el documento que permitieron el análisis expuesto.