



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

MODELACIÓN DE UNA RED BACKHAUL LTE UTILIZANDO
SOFTWARE OPEN SOURCE PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO
DE RED, ANTE EL INCREMENTO DE USUARIOS MÓVILES

SANTIAGO JAVIER ALVARO PILLALAZA

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGISTER EN INTERCONECTIVIDAD DE REDES

Riobamba – Ecuador

Noviembre 2018



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación Modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado “Modelación de una red Backhaul LTE utilizando software Open Source para mejorar el desempeño de red, ante el incremento de usuarios móviles, de responsabilidad del Sr. Santiago Javier Alvaro Pillalaza, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

ING. FREDY PROAÑO ORTIZ, PhD.

PRESIDENTE

FIRMA

ING. Carlos Badillo Salazar, MSc.

DIRECTOR

FIRMA

ING. Gladys Aguirre Sailema, MSc.

MIEMBRO DE TRIBUNAL

FIRMA

ING. Marco Ramos Valencia, MSc.

MIEMBRO DE TRIBUNAL

FIRMA

Riobamba, noviembre 2018

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Santiago Javier Alvaro Pillalaza, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Santiago Javier Alvaro Pillalaza
Nro. Cédula 1713899647

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Santiago Javier Alvaro Pillalaza, declaro que el presente Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están, debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, noviembre 2018

Santiago Javier Alvaro Pillalaza

Nro. Cédula 1713899647

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a la memoria de mis padres. A mi esposa Paty por todo su apoyo incondicional, a mis hijos Celia y Jhoan fuente de inspiración que me permiten día a día seguir cumpliendo los objetivos de vida. A mi Dios por regalarme la vida y ser fuente de inspiración. A mis compañeros y amigos del curso de maestría por los momentos compartidos.

AGRADECIMIENTO

El mayor agradecimiento a Dios por darme la oportunidad de cumplir este objetivo, por brindarme fortaleza y sabiduría en cada instante del camino.

A mi Tutor, Carlos Gualberto Badillo un agradecimiento especial por haber aceptado dirigir este trabajo de titulación, además por compartir su tiempo, conocimiento, sugerencias y críticas.

A Marco Vinicio Ramos y Gladys Lorena Aguirre por haber aceptado ser miembros del tribunal de esta propuesta, agradecido por su disposición y conocimiento en la revisión y corrección del trabajo de investigación.

A Blanca Hidalgo, coordinadora de la maestría en interconectividad de redes por su gestión, apoyo e impulso para la realización del proyecto.

A todas las personas que siempre me impulsaron a culminar este objetivo profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DERECHOS INTELECTUALES.....	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Situación problemática.....	1
1.3 Formulación del problema	2
1.4 Justificación de la investigación.....	2
1.5 Objetivos de la investigación	3
1.6 Hipótesis.....	4
CAPÍTULO II	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Estado del Arte.....	5
2.2 Red móvil LTE.....	9
2.3 Red backhaul en una red móvil.....	10
2.4 Red backhaul en LTE.....	12
2.5 Simuladores Open Source para redes móviles	17
CAPÍTULO III.....	22

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	22
3.1 Tipo de investigación.....	22
3.2 Diseño de la investigación.....	22
3.3 Métodos de investigación.....	23
3.4 Enfoque de la investigación.....	24
3.5 Alcance de la investigación.....	24
3.6 Población de estudio.....	25
3.7 Unidad de análisis.....	26
3.8 Selección de la muestra.....	26
3.9 Tamaño de la muestra.....	26
3.10 Técnica de recolección de datos.....	27
3.11 Instrumentos de recolección de datos.....	27
3.12 Instrumentos para procesar datos recopilados.....	27
3.13 Planteamiento de la Hipótesis.....	28
3.14 Identificación de variables.....	28
3.15 Operacionalización de variables.....	28
CAPÍTULO IV	29
4. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UNA RED BACKHAUL LTE	29
4.1 Recursos de Modelación y Simulación de red.....	29
4.2 Selección del software de Modelación.....	30
4.3 Software de modelación y simulación OMNET++.....	33
4.4 Modelación de la red backhaul LTE.....	33
4.5 Escenarios de prueba.....	44
CAPÍTULO V	47
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
5.1 Procedimiento para análisis de resultados.....	47
5.2 Resultados de las simulaciones en el primer escenario.....	48

5.3	Resultados de las simulaciones en el segundo escenario	49
5.4	Resultados de las simulaciones en el tercer escenario	51
5.5	Resultados de las simulaciones en el cuarto escenario	52
5.6	Análisis estadístico de resultados.....	53
5.6.1	Desempeño de la red backhaul LTE	60
5.7	Planteamiento de solución.....	62
5.8	Prueba de hipótesis.....	66
5.8.1	Planteamiento de la hipótesis	66
5.8.2	Elección de la prueba estadística.....	67
5.8.3	Definición del nivel de significancia.....	67
5.8.4	Valoración cuantitativa de las muestras de la variable dependiente	67
5.8.5	Análisis de la variable dependiente.....	68
5.8.6	Grados de libertad	69
5.8.7	Decisión	69
	CONCLUSIONES	70
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 . Características de simuladores de redes	21
Tabla 2. Operacionalización de variables	28
Tabla 3. Valoración de nivel de relevancia	30
Tabla 4. Ponderación de parámetros	30
Tabla 5. Valoración cualitativa de los parámetros	31
Tabla 6. Valoración cuantitativa de los parámetros	32
Tabla 7. Categoría no ideal de backhaul	34
Tabla 8. Módulos y sub-módulos de red	35
Tabla 9. Resolución streaming de video	36
Tabla 10. Parámetros del servidor streaming de video	37
Tabla 11. Medios físicos entre nodos.....	40
Tabla 12. Parámetros del equipo de usuario	41
Tabla 13. Parámetros de e-NB	42
Tabla 14. Resultados obtenidos de las simulaciones del primer escenario de pruebas	48
Tabla 15. Información recopilada de las simulaciones del segundo escenario de pruebas	50
Tabla 16. Información recopilada de las simulaciones del tercer escenario de pruebas	51
Tabla 17. Información recopilada de las simulaciones del cuarto escenario de pruebas	52
Tabla 18. Estadísticos descriptivos de paquetes enviados por el Servidor, por escenario	54
Tabla 19. Estadísticos descriptivos de los paquetes recibidos por el Router, por escenario	54

Tabla 20. Estadísticos descriptivos de los paquetes enviados por el Router, por escenario	55
Tabla 21. Estadísticos descriptivos de los paquetes recibidos por el PGW, por escenario	55
Tabla 22. Estadísticos descriptivos de los paquetes enviado por el PGW, por escenario	56
Tabla 23. Estadísticos descriptivos de los paquetes recibidos por la e-Nb, por escenario.....	56
Tabla 24. Tasa de paquetes pedidos en todo el trayecto de red.....	57
Tabla 25. Paquetes perdidos por cada elemento de red y enlace	57
Tabla 26. Tasa de paquetes perdidos en el backhaul LTE	59
Tabla 27. Estimación de la tasa de paquetes perdidos en escenarios con menor número de UEs ...	60
Tabla 28. Desempeño de la red backhaul LTE	61
Tabla 29. Variación de la longitud del paquete en el primer escenario	63
Tabla 30. Variación de la longitud del paquete en el segundo escenario.....	64
Tabla 31. Variación de la longitud del paquete en el tercer escenario	65
Tabla 32. Variación de la longitud del paquete en el cuarto escenario	65
Tabla 33. Porcentaje de pérdida de paquetes por escenario	66
Tabla 34. Cuantificación de los resultados antes de modificar el tamaño de los paquetes	67
Tabla 35. Cuantificación de los resultados después de modificar el tamaño de los paquetes.....	68
Tabla 36. Análisis de la variable dependiente.....	68
Tabla 37. Valores críticos de la distribución t.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura del sistema LTE.....	10
Figura 2. Red backhaul en la arquitectura de red móvil tradicional	11
Figura 3. Arquitectura de Red backhaul en LTE	12
Figura 4. Demanda de tráfico de datos en un día - Carga de hora ocupada.....	15
Figura 5. Demanda de tráfico de datos en una semana - Perfil de carga semanal	15
Figura 6. Intensidad de tráfico en dos eNBs en el mismo tiempo.....	16
Figura 7. Porción de red backhaul LTE	34
Figura 8. Módulo y sub-módulos que forman el Servidor streaming de video.....	37
Figura 9. Módulo y sub-módulos que forman el Router.....	38
Figura 10. Módulo y sub-módulos que forman el P-GW.....	38
Figura 11. Módulo y sub-módulos que forman la e-NB	39
Figura 12. Módulo y sub-módulos que forman el equipo de usuario (UE)	40
Figura 13. Entorno gráfico del modelo de red backhaul LTE.....	43
Figura 14. Escenarios de simulación de la red backhaul LTE	45
Figura 15. Porción de red backhaul LTE	48
Figura 16. Paquetes enviados PGW y paquetes recibidos E-NB	58
Figura 17. Tasa de paquetes perdidos en la transmisión de la red backhaul (eje y) vs UEs (eje x) .	59
Figura 18. Desempeño del Backhaul vs equipos de usuario.....	61
Figura 19. Datagrama UDP.....	62

Figura 20. Cabecera IP..... 62

GLOSARIO DE TÉRMINOS

3GPP	3rd Generación Partnership Project
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
FDD	Frequency Division Duplex
GPRS	General Packet Radio Service
HC	Handover Control
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High-Speed Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
LTE	Long-Term Evolution
GSM	Global System for Mobile Communications
E-NodeB	Evolved Base station
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
RTP	Real Time Protocol
SF	Spreading Factor
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband CDMA
DL	Down Link
UL	Up Link
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
MME	Mobile Management Entity
SGW	Serving Gateway
PDN	Packet Data Network Gateway
FDMA	Frequency Division Multiple Access

RESUMEN

El trabajo de titulación se desarrolló con el objetivo de modelar una red backhaul LTE utilizando software Open Source para mejorar el desempeño de red ante el incremento de usuarios móviles, el estudio surgió de la necesidad de mejorar el desempeño de una porción de red backhaul LTE de orden rural a medida que se incrementa el flujo de datos provocado por el tráfico de video streaming debido al aumento del número de equipos de usuario conectados a la red. El método utilizado en el desarrollo del trabajo de titulación fue el científico, también se utilizó el método sistémico el cual permitió la unión racional de los elementos de red para establecer el modelo de simulación. A través del software Open Source para la modelación y simulación de redes de datos se crearon cuatro escenarios de red con características técnicas de arquitectura funcional. Mediante la gestión de paquetes a través de la simulación se logró establecer la tasa de paquetes perdidos menor del 1% y asegurar que la disponibilidad de la red sea mayor al 99,4% tal como recomienda la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). La modelación de red permitió mejorar el desempeño de red ante la inminente degradación, sin necesidad de intrusión a equipos, pruebas físicas que interrumpan operaciones o gastos de operatividad para las pruebas de carga. Se recomienda que para la modelación y simulación de red se disponga de un computador de mayor capacidad de procesamiento o clúster para incluir variedad de tráfico, elementos del plano de control, aumentar el número de nodos base evolucionados (E-NB) y que además permita realizar mayor número de simulaciones en menor tiempo.

Palabras Claves: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <COMUNICACIONES MÓVILES>, <REDES DE DATOS>, <RED BACKHAUL LTE>, <STREAMING DE VIDEO>, <FLUJO DE DATOS>, <TRÁFICO DE VIDEO>, <EQUIPOS DE USUARIO>.

ABSTRACT

The degree work was developed with the objective of modeling an LTE backhaul network using Open Source software to improve network performance in the face of an increase in mobile users, the study arose from the need to improve the performance of a portion of LTE backhaul network rural order as the flow of data caused by video streaming traffic increases due to the increase in the number of user equipment connected to the network. The method used in the development of the present work was the scientific one, also the systemic method was used, which allowed the rational union of the network elements to establish the simulation model. Through Open Source software for the modeling and simulation of data networks, four network scenarios with functional architecture technical characteristics were created. Through package management via simulation, the lost packet rate of less than 1% was established and the availability of the network was greater than 99.4%, as recommended by the Telecommunications Regulation and Control Agency (ARCOTEL). The network modeling allowed to improve network performance in the face of imminent degradation, without the need for equipment intrusion, physical tests that interrupt operations or operational expenses for load tests. It is recommended that for network modeling and simulation, a computer of greater processing capacity or cluster be available to include a variety of traffic, elements of the control plane, increase the number of evolved base nodes (E-NB) and also allow the performance of more number of simulations in less time.

Key Words: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCE>, <MOBILE COMMUNICATIONS>, <DATA NETWORKS>, < BACKHAUL LTE RED >, <VIDEO STREAMING>, <DATA FLOW>, <VIDEO TRAFFIC>, <EQUIPMENT USER>.

CAPÍTULO I

Este capítulo proporciona un panorama general de lo que trata la investigación. Presenta el planteamiento del problema, la formulación del problema, la justificación de la investigación, el objetivo general, los objetivos específicos, así como la hipótesis.

1. INTRODUCCIÓN

Modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source para mejorar el desempeño de red, ante el incremento de usuarios móviles.

1.1 Planteamiento del problema

Cada año existen más personas que se adhieren a los sistemas de comunicación móvil mediante los equipos de usuario, esto provoca mayor cantidad de datos que circula en la red. En la actualidad el streaming de video es el tráfico más representativo en la red móvil. El impacto que tiene el aumento del tráfico de datos en la red backhaul LTE es de suma importancia debido a que se relaciona a gastos no previstos de infraestructura, intermitencias y congestión por la falta de prevención en el desempeño de red y sobre todo a la percepción que tienen los usuarios sobre los servicios que brinda la red.

1.2 Situación problemática

La red backhaul forma parte de la tecnología actual de comunicación móvil LTE, los avances de las comunicaciones móviles se sustentan sobre la tecnología de red backhaul LTE. A medida que evolucionan los sistemas de comunicación móvil aumenta el número de usuario y la demanda del servicio (CEPAL, 2016, pág. 50). Nueve de cada diez personas conectadas a internet en América latina utilizan el Smartphone (COMSCORE INC & IMS). Los usuarios de red tienden a demandar cada vez más servicios audiovisuales. En la actualidad, de todo el tráfico que existe en la red, el 67% es provocado por el streaming de video (CISCO VN 2017).

En cuanto a cobertura LTE, las actuales cifras regionales de América latina ubican a Ecuador en la media regional (FORO TIC's 2017). A pesar de ello, la realidad es que la cobertura de este sistema tiene impedimentos y limitaciones en zonas rurales y en ciertas zonas geográficas de difícil acceso,

estas limitaciones corresponden a factores geográficos, sociales e intereses de las operadoras, que despliegan infraestructuras según la densidad poblacional.

Los patrones de tráfico presentes en la red LTE son menos estables en relación a los patrones de las tecnologías anteriores. La red LTE tiende a presentar picos instantáneos, por lapsos cortos de tiempo, donde el tráfico excede la capacidad backhaul debido a flujos de tráfico del tipo multimedia (GROUP, 2016). Debido a este pico de tráfico instantáneo el desempeño de la red backhaul se ve afectado. El desempeño de la red backhaul LTE es un componente fundamental muchas veces ignorado o descartado por la complejidad de acceder a equipos reales para realizar pruebas de carga.

A pesar del despliegue que presenta la tecnología LTE en la ciudad de Quito, existe ciertas zonas rurales que presentan limitaciones debido a factores geográficos, sociales e intereses de las operadoras, donde el despliegue de la tecnología en áreas extendidas con pocos abonados podría no resultar rentable económicamente. En este contexto, la situación actual de la porción de red backhaul LTE ubicada en la comuna de llano grande, en la zona rural de la ciudad de Quito, requiere de un análisis de desempeño para optimizar la red, sin inversión de gastos operativos, intrusión a equipos o pruebas físicas que interrumpan los servicios, considerando que el crecimiento del tráfico del tipo streaming de video está en aumento.

1.3 Formulación del problema

La modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source permitirá mejorar el desempeño de red, ante el incremento de usuarios móviles

1.4 Justificación de la investigación

El trabajo de investigación es importante debido a que aborda un problema actual relacionado a la porción de red backhaul LTE ubicada en la comuna de llano grande, zona rural de la ciudad de Quito, donde el despliegue de la tecnología es limitada.

El trabajo de investigación es significativo porque tiene la finalidad de realizar un análisis prospectivo del desempeño de la porción de red backhaul LTE en relación al incremento del tráfico de datos provocado por el streaming de video, como medida de prevención ante futuros problemas de congestión.

El trabajo de investigación se vuelve sustancial porque brinda atención y pretende gestionar la continuidad del servicio de la red backhaul LTE ante la posible degradación de desempeño para garantizar la disponibilidad del servicio tal como lo recomienda la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones.

Mediante la investigación se espera realizar un análisis longitudinal a corto plazo del desempeño de una porción de red backhaul LTE, presentando escenarios de pruebas ensamblados en un software de modelación Open Source debido a la complejidad de acceder a equipos reales para el análisis y cuya operatividad es elevada en costo, con la finalidad de realizar pruebas de carga en la red que permitan obtener resultados y *servan* como base fundamental para proponer una solución viable frente a posibles problemas de desempeño de red.

La investigación planteada es viable debido a que la comunidad académica y científica utiliza herramientas de modelación y simulación como práctica común, para evaluar el desempeño de protocolos de red, evaluar calidad de servicio en redes de comunicación, verificar causa efecto al introducir cambios en los parámetros de las tecnologías de comunicación ya existentes, y sobre todo para establecer entornos de prueba que permitan descartar o corregir posibles problemas en la red.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Modelar una red Backhaul LTE utilizando software Open Source para mejorar el desempeño de la red, ante el incremento de usuarios móviles.

1.5.2 Objetivo específico

- Diseñar un modelo de red backhaul LTE considerando los elementos de infraestructura característicos, utilizando software Open Source para modelación y simulación de redes.

- Implementar cuatro escenarios de simulación en el software Open Source, a partir del modelo de red backhaul LTE, para realizar cargas de tráfico de tipo streaming de video a través del incremento de equipos de usuario.
- Evaluar el desempeño de la red backhaul LTE basado en la tasa de paquetes perdidos que presentan los escenarios de simulación, para detectar una posible degradación en el desempeño de red.

1.6 Hipótesis

La modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source permitirá mejorar el desempeño de red ante el incremento de usuarios móviles.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Para cumplir con el objetivo que se plantea en la investigación se utilizar el método científico, el cual tiene entre una de sus etapas la revisión literaria. Debido a ello, en este capítulo se realiza la revisión literaria y el estado del arte mediante la cual se pretende obtener información relevante y necesaria para el desarrollo de la investigación. Además, este capítulo ofrece una visión general y específica de la red backhaul LTE y sus componentes. Y se detalla los aspectos más relevantes de los simuladores de red Open Source.

2.1 Estado del Arte

De acuerdo a la exploración literaria se logra establecer el material bibliográfico relacionado al tema de investigación. También se describe material bibliográfico relacionado a herramientas de modelación útiles para simulación de redes móviles. A continuación se indica los esfuerzos académicos e investigativos que se han realizado en torno al tema planteado.

“*Mobile backhaul Networking*”, B. Lavallée , Ciena Corporation, 2016. Ciena es un proveedor global de equipos de redes de telecomunicaciones, software y servicios, con sede en Estados Unidos. Este *libro* analiza los inicios de la tecnología de *redes Backhaul móvil*, en la que nos encontramos hoy, y en donde se espera que esta parte de la infraestructura de la red móvil se dirija en el futuro, considerando la creciente demanda de las redes móviles y los servicios asociados.

“*LTE BACKHAUL Planning and Optimization*”, E. Metsala, J. Salmelin, Nokia Networks, Finlandia, 2016. Este *libro* tiene la intención de ofrecer una visión de planificación y optimización del backhaul. Con el backhaul de LTE, varias áreas funcionales como la sincronización, la calidad de servicio y la seguridad, requieren nuevos análisis.

“*Contribución a la Mejora de Control de Flujo en Redes de Acceso Inalámbrico*” , J. Alcazar, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2015. *Tesis Doctoral*. Esta tesis tiene como principal finalidad abordar problemas asociados a la congestión en el backhaul mediante la optimización matemática y el impacto que tiene el backhaul en el algoritmo de gestión de recursos de radio.

“Análisis prospectivo del despliegue de redes de comunicaciones móviles LTE en nuevas bandas de frecuencia mediante el desarrollo de modelos tecnoeconómicos”, Z. Frías, Departamento de señales, sistemas y radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. *Tesis Doctoral*. Este trabajo de investigación trata sobre como el estándar LTE se ha posicionado como una de las claves para que las operadoras de servicios móviles puedan afrontar de manera eficiente el crecimiento de la demanda de tráfico móvil que se prevé para los próximos años.

“Optimización de la cobertura y la capacidad en redes LTE mediante procesado de eventos complejos”, V. García, Escuela de Ingeniería en telecomunicaciones, Universidad de Málaga, 2017. *Tesis doctoral*. En esta tesis se encuentra de forma detallada los conceptos básicos de la red LTE y propone afrontar el problema de aumento del tamaño y complejidad de las actuales redes de comunicaciones móviles, mediante herramientas automáticas capaces de recopilar y procesar las medidas de red con una mínima intervención humana poniendo una atención especial a los algoritmos de optimización automática de parámetros de la red LTE.

“Optimización de la red de acceso IP para interconectar nodos LTE hacia el Core de Servicios de la plataforma de datos móviles”, J. Paredes, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, 2016. *Tesis de Maestría en redes de Comunicación*. Este trabajo presenta un plan de acciones a considerar para fortalecer las cualidades de la red MPLS para asegurar la escalabilidad y calidad de servicio para los clientes CNT E.P.

“Análisis de desempeño de una red LTE basado en técnicas de múltiples antenas MIMO y de agregación de segunda portadora, en un escenario con alta densidad de tráfico”, J. Hoyos, A. Naula, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y computación, 2017. *Tesis de Maestría*. Este trabajo de investigación pretende poner a prueba los conocimientos teóricos sobre el comportamiento de la red LTE bajo ciertas condiciones de operación.

“Simulación y análisis de desempeño de la red LTE para infraestructura de medición avanzada en Smart Grid”, C. Cárdenas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de ingeniería Eléctrica, 2016. *Tesis de Maestría*. La tesis tiene como principal objetivo, describir la simulación en OMNET y análisis de desempeño de la red de comunicaciones LTE al servicio de las redes eléctricas inteligentes.

“Análisis del rendimiento de transmisión de datos en redes móviles para diferentes configuraciones de la pila TCP-IP”, D. Cevallos, R. Ortiz, Escuela Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, 2016. *Tesis de Tercer nivel*. Esta tesis presenta el rendimiento de redes móviles a través de pruebas con equipos conectados externamente a la red, con parámetros configurables como UMT y registro de tiempos a través del protocolo FTP.

“Guía de evaluación del rendimiento de una red de datos con tecnología Ethernet”, C. Pachacama, J. Avilés, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería en Sistemas y Computación, 2015. *Tesis de tercer nivel*. Esta tesis tiene como objetivo elaborar una guía de evaluación de rendimiento de una red de datos de tecnología Ethernet.

“Implementación de un ambiente de simulación basado en software libre para el estudio de la provisión de servicios de comunicaciones”, L. Caldas, J. Zaruma, Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de ingeniería Electrónica, 2014. *Tesis de tercer nivel*. Esta tesis presenta un estudio de una clase de red ad-hoc utilizando OMNET++ cuya simulación se basa en nodos móviles. Esta tesis muestra las ventajas e importancia del análisis de redes de telecomunicaciones mediante el uso del simulador OMNET++.

“Modelado y simulación de redes con OMNET”, B. Mejía, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad d Ingeniería, 2012. *Tesis de tercer nivel*. Esta tesis presenta la implementación de redes inalámbricas y utiliza OMNeT++ como una de las herramientas de simulación de código abierto, este estudio concluye que OMNET es una herramienta fiable y que puede ser útil para estudios futuros de calidad de servicio, comparación de eficiencia.

“Design and analysis of a resilient packet ring-based backhaul for LTE network that reduces handover latency”, A. Mukhopadhyay, G. Das. 2016. *Artículo*. DOI 10.1007/s11107-016-0672-x. Este documento presenta una arquitectura de red LTE, y realiza una discusión acerca de la arquitectura de red sin comprometer la seguridad.

“Dimensioning X2 backhaul link in LTE networks”, A. Blogowski, O. Klopffentein, B. Renard, 2016. *Artículo*. DOI 10.1109/ICC.2012.6363773. Este artículo trata sobre las mejoras implementadas entre la conexión de las estaciones base a través de la interfaz x_2 , en relación al impacto de la movilidad del usuario.

“Simulated Performance Metrics of LTE systems for large number of users”, Subramanian, & Radhakrishnan, International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (2015) En esta revista se presentó un estudio del rendimiento de algunos de los programadores a elegirse para su aplicación en términos de rendimiento, demora, proporción de pérdida de paquetes y equidad, utilizando un simulador estándar. Uno de los resultados más importantes fue que bajo el programador de prioridades PF, el retraso de VOIP aumenta cuando el número de usuarios aumenta de 75 a 100; en tanto que, el índice de equidad VOIP se reduce a medida que disminuye el número de usuarios y luego aumenta de nuevo.

“Estudio, diseño y simulación de una red LTE para telefonía móvil en los valles de Tumbaco y los Chillo utilizando software predictivo”, H. Manosalvas, A. Santamaría, Escuela Politécnica del Ejército, Facultad de Eléctrica y Electrónica, 2012. *Artículo*. Este artículo realiza un diseño y simulación de una red LTE para una zona específica de la ciudad de Quito, para dicho diseño se tomó en cuenta los principios teóricos de la red backhaul LTE, cuyos conceptos son de gran ayuda para considerarlos en el estudio planteado.

“Comparative Analysis of the Performance Of Resource Allocation Algorithms In Long Term Evolution Networks”, Nigerian Journal of Technology, 2017. En esta investigación se realizó la simulación del rendimiento en los parámetros de calidad del servicio QoS de las diferentes aplicaciones en redes LTE, con el fin de analizar el impacto de esquemas de asignación de recursos que proporcionar un mejor rendimiento a los usuarios de datos; las observaciones se realizaron después de la finalización de la simulación y se evaluó el rendimiento mediante el análisis gráfico. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones permitieron recomendar que se explore un método eficiente de administración de recursos de radio, el cual puede ser justo para los servicios que no son en tiempo real (Nwawelu, Ani, & Ahaneku, 2017).

La información recopilada, conforma el estado del arte de los estudios desarrollados en relación al tema de investigación. Se ha contemplado estudios nacionales e internacionales considerados como fuentes relevantes que aportan al conocimiento para la investigación. La aplicación de simulaciones con base en sistemas o plataformas de comunicación, mediante la evaluación de las respuestas obtenidas bajo ciertas condiciones que el investigador establece, denominadas escenarios, modificando o asignando variabilidad intencionalmente sobre los valores asignados a los parámetros, permite tomar decisiones fundamentadas en los resultados de estas simulaciones con el

fin de establecer servicios más eficiente, y así evitar pérdidas en inversiones o incurrir en costos innecesarios.

2.2 Red móvil LTE

Las siglas LTE representan el término en inglés *Long Term Evolution*, traducido al español significa Evolución a largo Plazo. LTE es una tecnología de transmisión de datos que brindar acceso a internet a los dispositivos móviles. LTE surge principalmente de las necesidades de conexión de los usuarios para subir y bajar datos a tasas de transmisión cada vez más exigentes. LTE es una tecnología que de acuerdo con la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) fue considerada como 3.9G, ya que no cumplía con los requisitos del IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications - Advanced), en términos de velocidades de transmisión que debían ser iguales o superiores a 1 Gbps. Lo mismo ocurría para WiMAX móvil 1.0 (IEEE 802.16e), lo que no permitía a los comercializadores de equipos ofrecer LTE y WiMAX como tecnologías de 4G. En diciembre de 2010, la UIT reconsidero su definición para sistemas 4G y dio su autorización para describir tecnologías LTE y WiMAX móvil 1.0 como sistemas 4G (C.Cox, 2012)

2.2.1 Arquitectura del sistema móvil LTE

En el caso de LTE, las especificaciones de arquitectura del sistema móvil surgen del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), Proyecto de Asociación para la Tercera Generación que apareció en 1998 con el objetivo de establecer las especificaciones de un sistema global de comunicaciones 3G. Los documentos del 3GPP se estructuran en *Releases*, traducido al español tiene el significado de *versiones liberadas*, cada *releases* se caracteriza por la incorporación de un conjunto de funcionalidades destacadas en relación a la versión anterior (Moreno Tubón, 2017, pág. 17)

El termino LTE se dio a conocer en el 3GPP para identificar una línea de trabajo cuya finalidad era estudiar la evolución de la tecnología de acceso UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles, primera red de tercera generación, conocida como UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access network*) Red de Acceso Terrestre UMTS.

Posteriormente, la nueva red de acceso adopta el nombre de E-UTRAN (*Evolved UTRAN*) o conocido como UTRAN evolucionado. Para la red troncal 3GPP se adoptó el término SAE (*System Architecture Evolution*) Sistema de Evolución de la Arquitectura, es la arquitectura de red troncal

para LTE. La composición de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC (*Evolved Packet Core*) Núcleo Paquetes Evolucionado, constituyen la nueva red UMTS evolucionada y toma el nombre de EPS (*Evolved Packet System*) Evolución del sistema de paquetes, Tal como se detalla en la Figura 1.

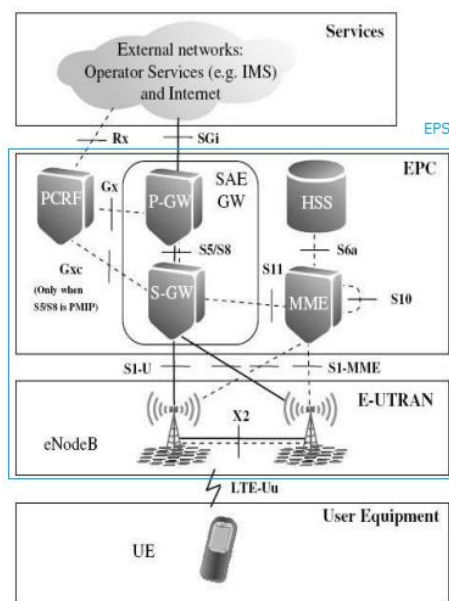


Figura 1. Arquitectura del sistema LTE.

Fuente: k. Budigere, B. Chemmagate, Paper Long Term Evolution of 3GPP, 2015.

Es común encontrar que LTE es sinónimo de EPS (...), los componentes fundamentales de un sistema LTE cuya denominación formal es *Evolved Packet System* EPS, son la red de acceso E-UTRAN y el dominio de paquetes EPC de la red troncal. (Agustí Comes, 2010, pág. 55)

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC brindan el servicio de transferencia de paquetes IP entre equipos de usuario y red de paquetes externas como internet, este servicio se denomina servicio portador EPS (Agustí Comes, 2010, pág. 61)

2.3 Red backhaul en una red móvil

La red backhaul es la parte de una red móvil de comunicación que conecta las estaciones base a controladores de red dentro de un área de cobertura. La red de transporte, que interconecta el controlador de red y la red central, se denomina red central de transporte. Algunas definiciones en la

industria extienden la definición de una red backhaul para incluir la red central de transporte, el presente trabajo de investigación no lo considera de esta manera.

El tráfico de voz es el que ha establecido los requerimientos de diseño de las redes backhaul. El desarrollo tecnológico en los terminales de usuario y las aplicaciones ha impulsado un mayor servicio de datos (...), en este ámbito las redes backhaul tuvieron que adaptarse para satisfacer los mayores requerimientos de ancho de banda asociados a la introducción de la tecnología HSPA (*High Speed Packet Access*) y posteriormente a los requerimientos aún mayores de LTE (*Long Term Evolution*) (Alcazar Espín, 2015, pág. 10)

En la tecnología 2G el tráfico que generaba una estación base (BTS) era del orden de unos pocos Mbps, por lo que, aunque se empleaban dispositivos de agregación de tráfico (basados siempre en conmutación de circuitos), no se solía planificar un emplazamiento específico para ubicarlos. Con la llegada de la tecnología 3G cuando las funciones de concentración de tráfico y de optimización de la carga (*payload*) comenzaron a convertirse en esenciales y la red de acceso empezó a incorporar nodos específicos para estas funciones (Alcazar Espín, 2015, pág. 11)

Para tener un panorama comprensible de la red backhaul, en la Figura 2 se muestra las partes constituyentes de la red.

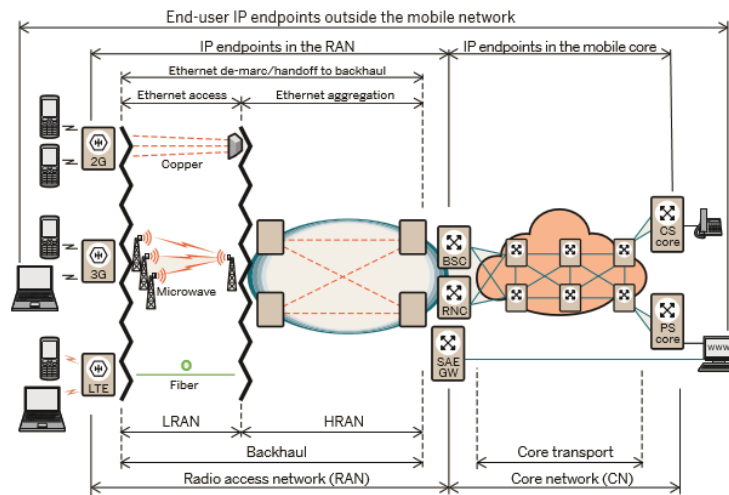


Figura 2. Red backhaul en la arquitectura de red móvil tradicional

Fuente: (Ericsson, pág. 5)

La red backhaul se divide en LRAN (*Low Radio Access Network*) Red baja de radio acceso y HRAN (*High Radio Access Network*) red alta de radio acceso. LRAN es la parte de acceso de la

base celular a la red backhaul. Generalmente LRAN incluye múltiples tecnologías de acceso físico como microondas, cobre y fibra. Mientras que HRAN es la parte de la red que recopila, agrega y concentra el tráfico de LRAN para conectarse a los controladores de radio. Esta parte de la red se basa comúnmente en la infraestructura de redes de fibra óptica.

2.4 Red backhaul en LTE

La red backhaul LTE es el medio de transporte entre las eNBs (*evolved NodeBs*) y los elementos de frontera de la red EPC (*Evolved Packet Core*). Los elementos de frontera que se encuentran en EPC son los MME (*Mobility Management Entity*) en español se entiende que es la entidad de gestión de movilidad y SGW (*Serving Gateway*) en español puerto de servicio y PGW (*Packet Data Network Gateway*) puerto de enlace a paquetes de datos. La representación de la arquitectura de red backhaul LTE, se muestra en la Figura 3.

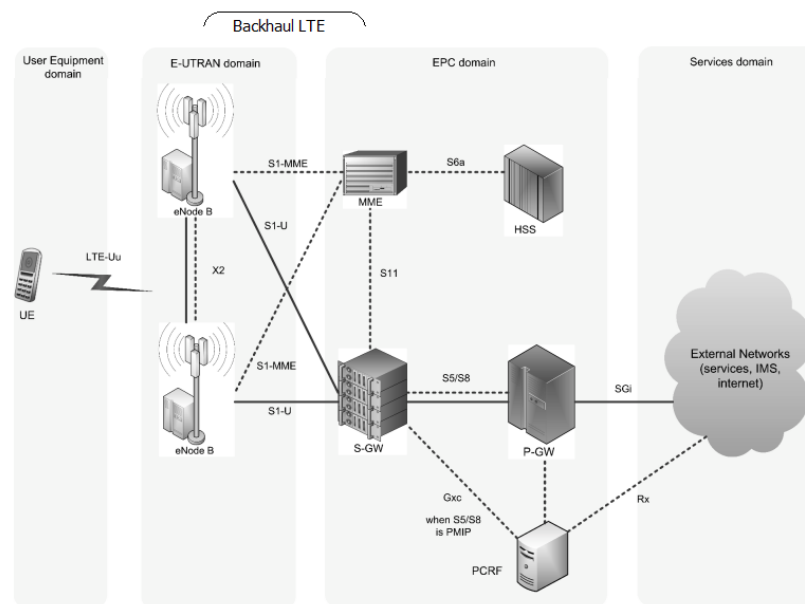


Figura 3. Arquitectura de Red backhaul en LTE

Fuente: (Sandu & Cserey, pág. 185)

El backhaul LTE comprende en dominio E-UTRAN y el dominio EPC. El dominio E-UTRAN está compuesto por una única entidad de red conocida como eNB (*evolved NodeB*), esta constituye la E-UTRAN e integra toda la funcionalidad de la red de acceso. En el dominio EPC se encuentran los elementos de frontera como el MME, S-GW y el P-GW.

2.4.1 Interfaces de comunicación de la red backhaul

El dominio E-UTRAN tiene tres interfaces de comunicación, mediante ellos se comunica con el resto de elementos del sistema, las interfaces son: E-UTRAN Uu o LTE Uu, S1, X2.

La interfaz LTE Uu, es la interfaz de radio LTE, que admite la transmisión de información por el canal radio entre la eNB y el equipo de usuario. La interfaz S1 permite conectar el eNB con la red de Core de paquetes evolucionada EPC. De forma concreta la interfaz S1 contiene dos interfaces, S1-MME que sustenta el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario (Agustí Comes, 2010, pág. 63). S1-MME se relaciona a los protocolos necesarios para sustentar la operación de la interfaz, la configuración del eNB se realiza desde la EPC a través de S1-MME. S1-U se relaciona a los protocolos que son utilizados para el envío de tráfico (paquetes IP) generado por los usuarios entre el E-UTRAN y EPC (...), la red de acceso conocida como E-UTRAN consiste en Nodos B evolucionados (eNBs) que proveen las funciones del enlace radio y el plano de control hacia el móvil.

La Interfaz X2, permite la conexión directa entre los eNBs. A través de esta interfaz realiza el traspaso de tráfico conocido como handoff, mientras que el tráfico asociado a la gestión de movilidad se envía a la entidad de control de movilidad MME por la interfaz S1-c. (Alcazar Espín, 2015, pág. 27)

2.4.2 Elementos de red backhaul LTE





Los dispositivos que forman parte de la red Backhaul LTE son: eNB, MME, S-GW, P-GW. La función de cada dispositivo se detalla a continuación. E-NB: *Evolved NodeB*, es el elemento funcional de la red de acceso E-UTRAN de LTE, es un elemento híbrido realiza las funciones de estación base y controlador. Este elemento de red se encarga de la comunicación directa e inalámbrica con los UE (*User Equipment*) equipos de usuario. El eNB utiliza los protocolos E-UTRAN OFDMA para enlaces Down y SC-FDMA para enlaces Up, su interfaz es LTE-Uu.

MME: *Mobility Management Entity*, es el dispositivo de red LTE y elemento principal del plano de control, su función es administrar el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. La principal función que realiza MME es la autenticación y autorización del acceso a los servicios de red a los usuarios, a través de E-UTRAN, además realiza el proceso de activación y desactivación del portador.

S-GW: *Serving Gateway*, es el dispositivo de red LTE cuya función prioritaria es enrutar y reenviar paquetes de datos de usuario. Además es el responsable del intercambio de tráfico de usuario entre la red de acceso y el núcleo de red IP. Este tráfico IP es procesado a través de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio que corresponda.

P-GW: *Serving Gateway*, es el dispositivo de red encargado de brindar conectividad entre la red LTE y las redes externas. El P-GW es el punto de conexión IP para el UE, en las redes esto se denomina puerta de enlace predeterminada. El P-GW asigna la dirección IP al UE, que le permite comunicarse con otros host IP en las redes externas o en internet. Además el P-GW actúa como punto de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y las redes externas. Todos los elementos que forman parte de la red backhaul LTE, se describen de forma resumida en el Cuadro 1, de elementos de red backhaul.

Elementos de la red Backhaul LTE

	UE: <i>User Equipment</i>		E-NB: <i>Evolved NodeB</i>
	MME: <i>Mobility Management Entity</i>		P-GW: <i>Serving Gateway</i>

Elaborado por: Santiago Alvaro

Fuente: (Sandu & Cserey, pág. 185)

2.4.3 Tráfico en la red backhaul LTE

El tráfico en la red backhaul LTE no es constante todo el tiempo, según el libro LTE backhaul, desarrollada por Esa Metsala indica que la fluctuación circundante de datos en la red varía en el transcurso del día y entre días de la semana. El momento que existe mayor demanda de datos en la red se conoce como carga de hora ocupada.

Debido a la rutina diaria y la movilidad de los usuarios, la carga de tráfico de un *eNB* no suele ser constante en el tiempo sino que alcanza su máxima demanda de tráfico durante la denominada

carga de *hora ocupada* BH (*Busy Hour*) (...), esto se da cuando la carga demandada es mucho mayor que el resto del día (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 46)

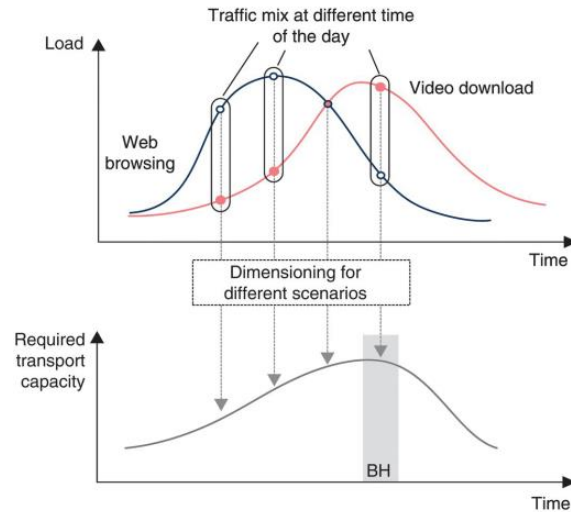


Figura 4. Demanda de tráfico de datos en un día - Carga de hora ocupada

Fuente: (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 46)

La Figura 4 muestra el comportamiento de la demanda del tráfico en *eNB* en función del tiempo, en este caso para un día. Un *eNB* puede tener más de un período de carga máxima durante un día normal. La carga máxima de un *eNB* está limitada por los recursos de la interfaz aérea y la capacidad de procesamiento de banda base de los *eNB* (...), la periodicidad más significativa de la carga de tráfico es de una vez al día. Sin embargo, además de la periodicidad diaria, pueden observarse períodos más largos. Por ejemplo, el tráfico puede ser diferente los días de la semana que durante el fin de semana, como muestra la Figura 5. (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 41)

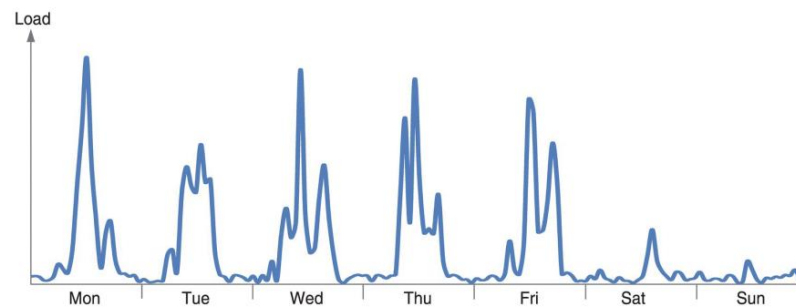


Figura 5. Demanda de tráfico de datos en una semana - Perfil de carga semanal

Fuente: (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 42)

Si el transporte del eNB está dimensionado para una demanda de tráfico menor que la resultante definida por la probabilidad de bloqueo, la calidad de servicio ofrecida a las conexiones admitidas o el rendimiento de las conexiones de datos se limitará inaceptablemente durante el BH (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 43)

La distribución diaria de la carga ofrecida por los eNB localizados cerca uno del otro puede ser muy similar, es probable que dos eNB suburbanos que prestan servicio a los usuarios de un vecindario determinado tengan BH al mismo tiempo. Como resultado, la intensidad agregada del tráfico de estos eNB mostraría una distribución diaria similar a la intensidad del tráfico de los eNB individuales (...), sin embargo, los eNB localizados en diferentes áreas (por ejemplo, urbanas y suburbanas) pueden tener una distribución de tráfico diaria significativamente diferente con BH a distintas horas del día. Por lo tanto, si la demanda se originó en dos o más áreas significativamente diferentes (por ejemplo, urbano y suburbano) se agrega por la infraestructura de transporte subyacente, la carga de tráfico resultante en los enlaces de orden superior tendrá una distribución diaria diferente y la carga máxima en la agregación los enlaces no alcanzarán la suma del tráfico BH que los eNB correspondientes tienen para servir (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 43)

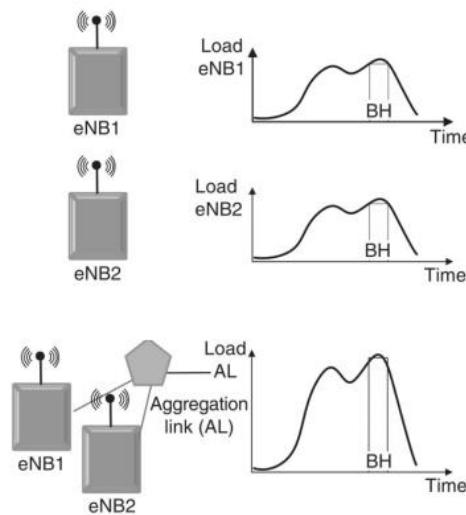


Figura 6. Intensidad de tráfico en dos eNBs en el mismo tiempo

Fuente: (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 43)

Cuando dos eNB tienen BH (*carga de hora ocupada*) a la misma hora del día, la carga resultante en el enlace de agregación es la suma de las cargas BH medidas en los dos eNB, como se aprecia en la Figura 6.

2.5 Simuladores Open Source para redes móviles

El uso creciente de herramientas tecnológicas de comunicación basada en datos, como lo son aquellas aplicaciones de Smartphones, entre las que se tienen: Facebook, Youtube, Netflix, Twitter, WhatsApp entre otras, implican interacciones variables que generan flujos de datos o *streams*, que se refiere a la secuencia continua de datos, que pueden saturar la red de transmisión de datos (Jaramillo, Cardona, & Fernández, 2015).

Para caracterizar con éxito las diferentes tecnologías de telecomunicaciones se dispone de múltiples herramientas, que se definen en tres grupos principales: el análisis del modelo teórico fundamentado en el desarrollo bibliográfico y los aportes de los autores relacionados con la tecnología a evaluar; en segundo lugar, se tiene la evaluación de datos reales suministrados por los equipos de monitorización de la tecnología; y, en tercer lugar, el empleo de simulaciones que se ejecutan con base a las premisas de un modelo específico (Hernández E. M., 2014).

Entre las diversas técnicas para evaluar el desempeño de una red de datos, se tiene la aplicación de métodos de análisis de minería de datos; esta técnica permite determinar el comportamiento o los patrones, tanto de los individuos que participan en la red, como de la red misma, a partir de las observaciones realizadas sobre la red, lo cual produce conocimiento adicional que contribuye a tomar decisiones sobre la optimización de la red (Jaramillo, Cardona, & Fernández, 2015).

En cambio, la simulación es una técnica numérica con la cual se pueden realizar experimentos que se definen en una computadora, fundamentados en modelos lógicos con los cuales se busca describir el comportamiento de sistemas (Aguilar & Heredia, 2013). Los simuladores para el análisis de redes son herramientas muy potentes basadas en software, diseñado especialmente para probar e implementar el comportamiento y la lógica de las redes, reduciendo los costos de evaluación que implicaría un experimento real; esto sumado a que no siempre se dispone de modelos teóricos que permitan predecir el comportamiento o la respuesta de algunas tecnologías (Hernández E. M., 2014).

Las simulaciones ofrecen múltiples beneficios, ya que permiten obtener resultados virtuales de la misma forma en que se haría en la realidad, se puede relacionar el nuevo conocimiento con la experiencia; también, es posible cometer errores con libertad sin provocar daños reales en equipos, con lo cual se toma experiencia en cuanto al uso de equipos nuevos, sofisticados o que van a ser implementados (Aguilar & Heredia, 2013).

Las redes móviles inalámbricas de nueva generación son sistemas complejos; por lo que, comprender su comportamiento o el comportamiento de los servicios que se ejecutan en estas redes es muy difícil y, a menudo, solo se puede evaluar correctamente mediante pruebas en escenarios de la vida real o emulando aspectos relevantes de dichos escenarios mediante simulaciones (Rusan & Vasiu, 2017). En este orden de ideas, las simulaciones de sistemas contribuyen en la toma de decisiones mediante la aportación de datos generados a partir de modelos, los cuales conforman determinados escenarios virtuales sobre el comportamiento de variables, individuos o sistemas.

Existen varias herramientas de simulación que permiten una adecuada implementación y análisis de sistemas de comunicación de datos complejos. Estos simuladores ofrecen posibilidades de alto desempeño, desde realizar una simulación con protocolos y modelos estándares, hasta tener la posibilidad de programar modelos propios. Debido a ello es importante realizar una valoración de las opciones existentes para poder elegir la herramienta que brinde mayores prestaciones (Santos Díaz, 2013, pág. 22). A continuación se describen un conjunto de simuladores de redes *Open Source* con sus principales características: NS – 2; KivaNS; JiST; OMNeT++; OPNET.

2.5.1 Simulador de redes de comunicación NS – 2

NS – 2 (*Network Simulator 2*) es un simulador de eventos discretos que está desarrollado para redes con un gran nivel de detalle. Este simulador es de código abierto y está enfocado a la investigación, el lenguaje que utiliza es C++ para modificar la propia herramienta y OTcl para implementar scripts para la configuración de las topologías. NS – 2 (Santos Díaz, 2013, pág. 28) puede simular una gran variedad de protocolos de cualquier capa del modelo OSI, entre los que se puede citar: RTP, TCP, UDP, HTTP, TELNET, CSMA/CA.

El NS-2 es un simulador gratuito, consta de un núcleo principal escrito en C++ al que se invoca simplemente tecleando NS en la línea de comandos. A partir de este punto se puede interactuar directamente con el simulador, a través de un lenguaje de interface. El lenguaje de interface es OTcl, una versión de Tcl 2 orientada a objetos (Capella Hernández, 2014, pág. 2)

El usuario define mediante un script (*línea de texto*) la pila de protocolos y otros aspectos básicos del tipo de red a simular, y proporciona a NS diversos datos, algunos en forma de ficheros acerca del escenario a simular, del tipo y características del tráfico se va a utilizar (...), finalmente, herramientas tales como Network Animator permiten realizar un análisis visual del envío y

recepción de paquetes de datos y control a medida que avanza la simulación (Capella Hernández, 2014, pág. 4)

Los sistemas operativos que pueden ejecutar NS – 2 son plataformas Unix (Free BSD, Linux, SunOS, Solaris) y plataformas Windows desde la versión 95. La interfaz de usuario tiene un editor de topología por código, es ahí donde se diseñan y configuran las redes y los protocolos. NS – 2 es una de las herramientas de simulación más antiguas, se ha convertido en un estándar (...), al realizar la simulación a través del software es importante tener en cuenta que el computador donde está alojado el simulador debe tener altas prestaciones de memoria y procesamiento (Capella Hernández, 2014, pág. 5)

2.5.2 Simulador de redes de comunicación KivaNS

KivaNS es un simulador gratuito de redes de comunicación multiplataforma basado en el lenguaje de programación Java, este simulador está principalmente orientado para simular redes que utilicen el protocolo IP, encaminamiento de paquetes, su principal utilización está en el estudio de los datagramas (...), también permite estudiar el funcionamiento de los protocolos ARP e ICMP además de emular el funcionamiento a nivel de la capa física de la tecnología Ethernet (Santos Díaz, 2013, pág. 29)

A través de la interfaz gráfica que proporciona Kiva se puede diseñar topologías concretas de red además permite configurar el direccionamiento y las tablas de encaminamiento de los dispositivos que forman parte de la red, además tiene la capacidad de simular diferentes tipos de errores como por ejemplo la pérdida de paquetes o fallos en el encaminamiento. Ofrece una API (*Application Programming Interface*) que permite utilizar las funciones de simulación desde otras aplicaciones de Java (Santos Díaz, 2013, pág. 31). KivaNS es enteramente implementada con Java y se compone de dos partes, la primera es una API que ofrece un motor de simulación de redes a otras aplicaciones y la segunda es una interfaz gráfica que hace uso del API de simulación. Dado que todo el entorno está realizado con Java, funciona en múltiples sistemas operativos, como pueden ser GNU/Linux o Microsoft Windows.

2.5.3 Simulador de redes de comunicación JiST

JiST (*Java in Simulation Time*), es un simulador de alto rendimiento orientado a objetos, basados en componentes y eventos discretos. Se utiliza para la simulación de redes inalámbricas que interactúa

con dispositivos hardware. Se ejecuta en una máquina virtual Java, su diseño permite superar tiempos de ejecución optimizando recursos como tiempo de simulación y consumo de memoria.

En JisT, las simulaciones de red están formadas por objetos que representan los elementos de la red y las interacciones entre los objetos. Los objetos avanzan en la simulación en tiempos independientes notificando al núcleo de la simulación (...) mientras que el código dentro de una entidad se ejecuta como cualquier programa de Java. Sólo las interacciones entre las distintas entidades se llevan a cabo en el tiempo de simulación. Por lo tanto, estas interacciones entre las entidades corresponden a los puntos de sincronización y facilitan la ejecución en paralelo del código en las diferentes entidades, lo que resulta en una potencial ganancia del rendimiento (Elección simulador de red, 2012, pág. 2)

2.5.4 Simulador de redes de comunicación OMNET++

OMNET++ es una herramienta de código abierto diseñado para modelado y simulación de eventos discretos, basada en componentes modulares y con un entorno de simulación de arquitectura abierta y con un fuerte soporte de GUI (...), OMNET++ provee una arquitectura modular basada en componentes (*módulos*), que se pueden ensamblar para obtener componentes y modelos más complejos utilizando un lenguaje de alto nivel (NED) (...). Su principal área de aplicación es la simulación de redes de comunicaciones, y debido a que su arquitectura es genérica y flexible, se utiliza exitosamente en el modelado de redes cableadas e inalámbricas, modelado de protocolos, evaluación de aspectos rendimiento en sistemas software complejos, validación de arquitecturas de hardware (Pérez, Valdiviezo, & Luque, 2013, pág. 145)

La motivación para el desarrollo de OMNET desde sus inicios fue producir una herramienta de código abierto (*Open Source*) poderosa que pudiera ser usada por la academia, en educación o investigación, y que fuera una alternativa a las herramientas comerciales, para ser implementada en sistemas tipo Unix, MAC y Windows (Morales M. , Calle, Tovar, & Cuéllar, 2013, pág. 31)

2.5.5 Simulador de redes móviles OPNET

OPNET versión Modeler, (Optimized Network Engineering Tools), es un software de modelado y simulación dinámico y discreto, la característica más relevante es que es un simulador orientado a objetos que permite interactuar con el usuario de forma simple en la creación de escenarios.

Dispone de variedad de librerías, permitiendo de esta manera simular gran diversidad de redes donde interviene un amplio número de protocolos y variables específicas que el usuario puede implementar, modificar y estudiar. Número de paquetes perdidos, throughput, jitter, caída de enlaces, potencia de transmisión son algunos de los parámetros que se pueden controlar. Cabe destacar que OPNET permite entre otras cosas dotar de movilidad a los nodos de la red, modificar el código fuente de las librerías de los nodos para alterar su comportamiento ante diversas acciones (R. Romero, 2013, pág. 21)

De acuerdo a la descripción que se realizó a cada simulador de red, se elabora la Tabla 1, extrayendo las principales características de cada software.

Tabla 1. Características de simuladores de redes

Software	Características
NS-2	Simulador de eventos discretos, código abierto, lenguaje C++ y OTcl orientada a objetos, multiplataforma, Interfaz gráfica.
kivaNS	Simulador de redes IP, multiplataforma, lenguaje Java, Interfaz gráfica.
JiST	Simulador orientada a objetos, lenguaje Java,
OMNET++	Simulador de eventos discretos, código abierto, componentes modulares, lenguaje NED para desarrollar la parte gráfica, multiplataforma, librerías LTE.
OPNET	Simulador de eventos discretos, orientado a objetos, librerías de red alámbrica e inalámbrica.

Elaborado por: Santiago Alvaro

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología de la investigación es el procedimiento que se realiza para llegar al objetivo del trabajo de titulación, en consecuencia este capítulo muestra las técnicas, mecanismos y procedimientos formales más adecuados y utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación, con el propósito de validar los datos y objetivos que se pretende lograr.

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utiliza para el desarrollo del trabajo de titulación, es experimental. Una de las características que posee este tipo de investigación es aislar el objeto de estudio y crear las condiciones necesarias para manipular una variable no comprobada, en condiciones controladas. En definitiva este tipo de investigación pretende definir las relaciones causales entre las variables (Metodología de investigación , 2013) Las variables definidas en la investigación son independiente y dependiente. La variable independiente definida como “*modelación de una red backhaul*” es la representación de la red de datos modelada en software OMNET++, el cual permite modificar condiciones de red con la finalidad de analizar la variable dependiente, definida como el “*desempeño de red*”.

3.2 Diseño de la investigación

El consumo de datos móviles en especial el streaming de video a través del Smartphone está en aumento, la estructura utilizada para intercambiar este tipo de información es la red backhaul LTE. La investigación se realiza en relación a este ámbito, por ello se define las siguientes consideraciones para el tratamiento de la investigación.

Se plantea crear un modelo representativo de red backhaul LTE implementado en un software open Source. El modelo de red tiene características técnicas de arquitectura funcional, que a través de un servidor externo a la red transfiera paquetes de video streaming a 31 equipos de usuario que corresponde al promedio de conexiones que soporta el E-NB en el transcurso del día.

A partir del modelo de red backhaul LTE se derivan los escenarios de simulación. Los escenarios consisten en mantener la estructura de red y variar el número de equipos de usuario. El primer escenario propuesto tiene 31 equipos terminales, el cual van incrementándose a 38, 45 y 52. Este

incremento corresponde al índice de penetración de LTE en América Latina sobre la utilización de los Smartphone en la red LTE (CEPAL, 2016, pág. 50).

Cada escenario de prueba será sometido a simulaciones. El número de simulaciones representa la periodicidad más significativa de la carga de tráfico en dos meses que presenta la red backhaul LTE. Cada simulación tendrá una duración de 10 segundos en el simulador, este tiempo representa la simultaneidad de utilización de todos los equipos de usuario que se conectan a la red backhaul LTE en un momento determinado del día. Cada simulación en tiempo real tiene una duración de 20 a 30 minutos dependiendo de escenarios a simular.

La red backhaul LTE a modelar tiene interés en el plano de usuario, es decir solo se toma en cuenta el tráfico de datos sin considerar plano de control. Esto se debe a que si se considera el plano de control, la red simulada manejara muchos mensajes de autenticación por equipo de usuario lo que implicara mayor capacidad de procesamiento por el computador y más tiempo de simulación.

3.3 Métodos de investigación

Los métodos utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación son un conjunto de procesos sistemáticos y críticos (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 4) que se aplican para lograr los objetivos de la investigación, los métodos utilizados son:

Método científico, este método tiene la caracteriza de ser organizado y metódico, excluye la intuición y la subjetividad, por esta razón este método es aplicado para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Entre las etapas más representativas que contiene este método se encuentra, el planteamiento del problema, marco teórico, hipótesis, variables y análisis de resultados (Morán & Alvarado, 2010, pág. 20), etapas con las que cuenta el trabajo de investigación planteado.

Método sistémico, este método consiste en la unión racional de varios elementos para establecer un modelo (Martinez, 2012), por las características que presenta este método de investigación, es aplicable al *capítulo IV, modelación de red backhaul LTE*, en la cual se determina los componentes de red y la relación que existe entre ellos para formar la red backhaul LTE. Por la naturaleza de la investigación este método fue el más extenso y difícil de efectuar debido a la complejidad para definir la funcionalidad de cada elemento que forma parte de la red.

Método deductivo, este método permite partir de datos generales aceptados como valederos y deducir por medio del razonamiento explicaciones particulares (Morán & Alvarado, 2010, pág. 12), por este motivo este método se aplica en el *capítulo V, Análisis de resultados*, en la cual se parte de resultados generales de cada escenario para establecer resultados particulares de cada elemento que forma parte de la red backhaul LTE. Además en este capítulo se utiliza el *Método analítico*, el cual tiene su utilidad al momento de estudiar los resultados obtenidos en las simulaciones, a partir del cual se establece juicios críticos.

Método comparativo, este procedimiento establece similitudes y diferencias de los resultados (Morán & Alvarado, 2010, pág. 12), este método se ajusta al propósito de la investigación ya que se establece una comparación de los resultados obtenidos en cada escenario de pruebas y a partir de ello establecer las *conclusiones* sobre el comportamiento de los elementos, medios de comunicación y desempeño de la red backhaul LTE ante el incremento de los usuarios móviles conectados en la red.

3.4 Enfoque de la investigación

El enfoque que presenta el trabajo de investigación es *cuantitativo*, debido a que en el trabajo de investigación se pretende medir y estimar magnitudes (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 5). Este enfoque se adapta a los requerimiento del trabajo de investigación ya que los resultados de los datos obtenidos en los escenarios simulación, en relación a los paquetes perdidos de los enviados, se representa mediante tablas de valores numéricos, porcentajes y representaciones gráficas que permiten apreciar los valores cuantitativos de forma evidente y admiten determinar particularidades.

3.5 Alcance de la investigación

La presente investigación tiene *alcance descriptivo*, este alcance permite especificar características del objeto de estudio el cual es sometido a análisis (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 80), este alcance conviene aplicar al trabajo de investigación por que permite describir las características de una porción de red backhaul LTE de orden rural y su comportamiento de desempeño ante el incremento del flujo de datos provocado por el aumento de usuarios móviles.

La investigación tiene *alcance correlacional*, este alcance tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre variables (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 81)

por lo tanto este alcance es aplicado a la investigación cuyo propósito es conocer la relación existe entre el desempeño de red backhaul LTE en relación al incremento del tráfico de tipo streaming de video provocado por el aumento de usuarios en la red.

La investigación también tiene *alcance explicativo*, este alcance pretende establecer las causas de los evento y las condiciones en que se manifiesta el objeto de estudio (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 84), por ello este alcance es utilizado en la investigación debido a que mediante la interpretación de resultados se procura responder la posible causal que provoca la degradación de desempeño en la red backhaul LTE.

3.6 Población de estudio

En base al modelo planteado de red backhaul LTE se derivan los cuatro escenarios de simulación. Los escenarios consisten en mantener la estructura de red y variar el número de equipos de usuario. El primer escenario propuesto tiene 31 equipos terminales que corresponde al promedio de conexiones que soporta el E-NB en el transcurso del día. Los siguientes escenarios tienen 38, 45 y 52 equipos terminales. El incremento de equipos de usuario corresponde al índice anual de crecimiento de la tecnología LTE en América Latina para los próximos cuatro años sobre la utilización de los Smartphone en la red LTE, según la CEPAL.

El modelo de red es una representación de una porción backhaul LTE de la compañía prestadora del Servicio Móvil Avanzado, que procura que sus abonados reciban de manera óptima los servicios ofrecidos. Una de las políticas internas de la operadora es monitorear la red por 40 días hábiles cuando está presenta indicios de vulnerabilidad debido a la congestión, con el fin de obtener una cantidad de datos suficiente para interpretar el comportamiento del indicador. La rutina diaria y la movilidad de los equipos de usuarios no son constantes en el tiempo sino que alcanza su máximo uso durante la hora de mayor utilización. La mayor carga de tráfico en la red es de una vez al día de lunes a viernes y durante los fines de semana son más ligeros.

En este contexto, la población de estudio son 4 escenarios de prueba, cada escenario será sometido a 40 simulaciones. Cada simulación representa la mayor carga de tráfico en la red por día. La mayor carga de tráfico se da cuando todos los abonados demandan streaming de video de forma simultánea.

3.7 Unidad de análisis

Según el documento *RFC 2544 de la IETF* define una serie de pruebas que pueden ser utilizados para describir el desempeño de una red, entre ellas están el *Frame Loos Rate*, *Porcentaje de Tramas Perdidas* (Bradner & McQuaid, s.f.). El *Frame Loos Rate* es la unidad que se escoge como elemento de análisis para los cuatro escenarios de pruebas, debido a que este componente determina la calidad de video que distingue el usuario de red en relación a los paquetes perdidos.

3.8 Selección de la muestra

La muestra es, en esencia, un subgrupo de la población (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 175), para la selección de la muestra en el trabajo de investigación se utiliza la técnica de *muestreo aleatorio simple* cuya característica es que todos los elementos de la población, en este caso todas las simulaciones realizadas a los escenarios de prueba, tengan la misma probabilidad de ser tomados en cuenta, esta técnica elimina cualquier posibilidad de sesgo.

3.9 Tamaño de la muestra

Para cada escenario de simulación se determinó que el tamaño de la población sea 40 que representa el número de simulaciones a los que son sometidos los escenarios propuestos. En este caso la población es finita y conocida.

El tamaño de la muestra es la representación de la población con cierta posibilidad de error y nivel de confianza (Fernández & Baptista, 2014, pág. 178). Para determinar el tamaño de la muestra n , según la estadística bayesiana existen varios niveles de confianza (Walpole, Myers, & Myers, Probabilidad y estadística, 2012, pág. 709) .

El nivel de confianza que se ha escogido es del 95% equivalente a 1.96 según la tabla de muestreo (Walpole, Myers, & Myers, Probabilidad y estadística, 2012, pág. 735) y con un margen de error del $e = 50\% = 0,05$ que es el complemento del nivel de confianza. Estos porcentajes permiten tener resultados más confiables al determinar el tamaño de la muestra. Otra consideración que se realiza para determinar n , es que cuando no existen información de estudios previos, $p = 50\% = 0,5$ que es la probabilidad a favor y $(1 - p) = 50\% = 0,5$ es la probabilidad en contra. El tamaño de la muestra se determina mediante la siguiente relación matemática (Sierra & Iparraquirre, 2018) .

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}$$

Parámetros de la muestra:

$N = 40$ población de estudio; $e = 5\% = 0,05$ Error máximo admisible; $Z = 95\% = 1,96$ Nivel de confianza; $p = 50\% = 0,5$ Probabilidad a favor. Remplazando los datos a la fórmula:

$$n = \frac{40 \cdot 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}{(40 - 1) \cdot 0,05^2 + 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}$$

$$n = 36$$

El resultado de aplicar los parámetros del tamaño de la muestra en fórmula, se obtiene $n = 36$, este valor es el número de simulaciones que se realizarán a cada escenario.

3.10 Técnica de recolección de datos

La técnica que se utiliza para la recolección de datos en la investigación, es la *observación*, útil para de extraer los resultados de las simulaciones. El tipo de observación utilizada por el investigador es la *observación directa*, mediante esta técnica se logra determinar el número de paquetes que son enviados y recibidos en cada nodo y enlace de la porción de red backhaul LTE.

3.11 Instrumentos de recolección de datos

El principal instrumento para la recolección de datos es una laptop marca Sony con un procesador Intel ® de 2,40 GHz, 8 GB de memoria, 250 GB de disco duro, sistema operativo W10 de 64 bits. En el computador están instalados los programas necesarios útiles para la modelación, simulación y recolección de datos. El *OMNET++*, *SimuLTE*, *INET-Framework* son los componentes software que permiten la modelación y simulación. *Microsoft Excel* es el programa utilizado para recolectar los datos que resultan de las simulaciones.

3.12 Instrumentos para procesar datos recopilados

Los datos generados por las simulaciones son almacenados y procesados por medio de una hoja de cálculo del utilitario *Microsoft Excel*, el cual permite tabular y graficar los datos producto de las simulaciones que posteriormente son utilizados para la discusión de resultados.

3.13 Planteamiento de la Hipótesis

La modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source permite mejorar el desempeño de la red ante el incremento de usuarios móviles.

3.14 Identificación de variables

Variable independiente: Modelación de una red backhaul LTE

Variable dependiente: Desempeño de red

3.15 Operacionalización de variables

Por medio de la Tabla 2 se muestra el tipo y definición conceptual de las variables establecidas en la investigación.

Tabla 2. Operacionalización de variables

Hipótesis general	Variables	Tipo	Conceptualización de variables
La modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source permitirá mejorar el desempeño de la red ante el incremento de usuarios móviles.	Modelación de una red backhaul LTE	Independiente	Es la representación de la red backhaul LTE mediante la utilización de software.
	Desempeño de red	dependiente	Parámetro de red que permite saber si la red está funcionando en forma óptima.

Elaborado por: Santiago Alvaro

CAPÍTULO IV

4. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UNA RED BACKHAUL LTE

En este capítulo se realiza el proceso de selección del software de modelación y simulación. Se describe la modelación de la red backhaul LTE, las características del entorno de trabajo y los escenarios de pruebas.

4.1 Recursos de Modelación y Simulación de red

La modelación de red consiste en abstraer una porción de la estructura backhaul LTE y construir un modelo que se ajuste al análisis de interés. El análisis y comportamiento de la red se realiza a través de la simulación mediante herramientas tecnológicas que ayudan a describir el comportamiento de la red ante el incremento de carga de tráfico que soporta la infraestructura de conexión entre los eNBs y el EPC, conocida como infraestructura backhaul del estándar LTE (CIENA, 2016, pág. 1)

A partir de los diversos software de simulación, tanto comercial como libre, surge la inquietud de saber cuál de las herramientas es la más conveniente para el propósito. Esta inquietud lo han afrontado muchos de los investigadores que realizan tareas de simulación de redes. En la mayoría de los casos no hay una metodología formal que permita tomar una decisión fundamentada e imparcial (Garcia, Lina, & Navarro, 2011, pág. 56)

En la literatura especializada se hallan varios trabajos, investigaciones y algunos casos de estudio acerca del análisis y evaluación de herramientas software de simulación para redes inalámbricas, la mayoría difieren en la selección de las herramientas evaluadas. No se encuentra en la literatura una metodología concreta para abordar esta dificultad de elección.

Sin embargo existe un artículo publicado en la *Revista Sistemas y Telemática* de la Universidad UCESI de Cali que propone un método de *Evaluación y Selección de Herramientas de Simulación de Redes*, que sugiere una forma de elegir un determinado software considerando los parámetros relevantes de la herramienta. La selección del software surge a partir de las comparaciones de parámetros de uso específico. Esta información es acogida como criterio para seleccionar la herramienta de simulación útil para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

4.2 Selección del software de Modelación

Para la selección del software de modelación se realiza dos consideraciones en relación a los parámetros relevantes de los simuladores. Primero, para cada simulador se valora el nivel de relevancia (*Tabla 3*) como Alta A, Media M, Baja B, Ninguna N. Si los recursos que necesita el sistema es mínimo la valoración será menor 4 o 5, por el contrario si los recursos necesarios del sistema es máximo, la valoración será mayor 1 o 2 (Garcia, Lina, & Navarro, 2011, pág. 56). Esta información es tomada como referencia del artículo de *Método de evaluación y selección de herramientas de simulación de redes*.

Tabla 3. Valoración de nivel de relevancia

Relevancia	Valor
Alta (A)	1
Media (M)	2
Baja (B)	4
Nula (N)	5

Fuente: (Garcia, Lina, & Navarro, 2011, pág. 59)

Segundo, para cada simulador se define una valoración adicional, orientada al nivel de soporte y tipo de aplicación que ofrece la herramienta. El valor que se da a la cualidad afirmativa es 1 y el valor de la cualidad negativa es 0, tal como se aprecia en la *Tabla 4*. Las características y parámetros que posee cada simulador son muchos, pero se han considerado solo parámetros que están dentro del alcance de los recursos de hardware destinados para la investigación (Morales M. , Calle, Tovar, & Cuéllar, 2013, pág. 35). También que se ha tomado en cuenta las recomendaciones para la elección de simuladores de redes que se muestra en el libro *Simulando con OMNET* de Manuel Calle.

Tabla 4. Ponderación de parámetros

Parámetro	Si	No
Múltiple plataforma	1	0
Orientación investigativa	1	0
Soporte	1	0
Licencia código abierto	1	0

Elaborado por: Santiago Alvaro

En este contexto, y de acuerdo al hardware destinado para la investigación, el cual es una Laptop que alberga dos sistemas operativos, Linux – Ubuntu y Windows 10 de 64 bits, un procesador Intel de 2,40 GHz, 8 GB de memoria, los parámetros seleccionados son:

Múltiple plataforma, este parámetro se refiere a que el simulador puede correr en distintos sistemas operativos. En el computador está instalado Windows 10 y Ubuntu.

Orientación Investigativa, este parámetro se refiere a la orientación que se da a cada simulador, pudiendo ser educativo o investigativo. El trabajo desarrollado es de tipo investigativo.

Recursos del sistema, este parámetro hace referencia a la cantidad de memoria que debe poseer el computador para que la ejecución del simulador no presente problemas. En este caso el computador tiene una memoria de 8 GB.

Recursos del procesamiento, este parámetro es de gran importancia a la hora de realizar la simulación, debido a que si no se cumple con los niveles requeridos del sistema, el computador puede presentar lentitud, provocado por sobrecarga al procesador. En este caso el computador tiene una memoria de 2.40 GB.

De los parámetros considerados, el tipo de *licencia* es una ventaja, puesto que, aquellas de libre acceso son las que en su mayoría se utilizan. Sin embargo, si las herramientas de simulación tienen código abierto es recomendable valorar también el *soporte*, debido a que los software de modelación son sistemas complejos sujetos a errores y fallos que no pueden ser resueltos por el usuario y que necesita el apoyo de personal especializado (SoftDoit, s.f.), para sugerir o resolver problemas presentes a la hora de desarrollar un modelo de red. De acuerdo a los parámetros mencionados, se ha elaborado la Tabla 5, que representa la valoración cuantitativa.

Tabla 5. Valoración cualitativa de los parámetros

Simulador	Múltiple plataforma	Orientación investigativa	Recursos del sistema	Recurso de procesamiento	Soporte	Licencia código abierto
NS-2	Si	No	Alto	Alto	Si	Si
KivalNS	Si	Si	Alto	Alto	No	Si
JiST	Si	No	Medio	Alto	No	Si
OPNET	Si	Si	Medio	Medio	Si	Si

OMNET++	Si	Si	Medio	Medio	Si	Si
---------	----	----	-------	-------	----	----

Elaborado por: Santiago Alvaro

Fundamentado en la ponderación establecida para cada parámetro de los simuladores, se presenta la valoración cuantitativa en la Tabla 6.

Tabla 6. Valoración cuantitativa de los parámetros

Simulador	Múltiple plataforma	Orientación investigativa	Recursos del sistema	Recurso de procesamiento	Soporte	Licencia	Total Ponderación
NS-2	1	0	1	1	1	1	5
KivalNS	1	1	1	1	0	1	5
JiST	1	0	2	1	0	1	5
OMNET++	1	1	2	2	1	1	8
OPNET	1	1	2	2	1	1	8

Elaborado por: Santiago Alvaro

Los cinco simuladores tomados como referencia tienen sus fortalezas y características, por lo que individualmente pueden llegar a ser el más adecuado para la utilización, dependiendo del propósito específico. Sin embargo el criterio para la selección del simulador se basa en la tabla de valoración cuantitativa de los parámetros y el objetivo del proyecto.

Por lo tanto la herramienta software que se puede utilizar según los criterios indicados puede ser OPNET u OMNET++ por tener igual ponderación. Sin embargo el software elegido es OMNET++ ya que posee una librería exclusiva de módulos y sub-módulos a través de INET Framework. INET que es un paquete de software adicional a OMNET++ exclusivo para elaborar redes LTE. INET utiliza el concepto de comunicación entre módulos a través de interfaces. Además existe variedad de información esencial en páginas web oficiales de OMNET++, SimuLTE e INET Framework sobre manuales de instalación de los paquetes software, ejemplos, documentos y foros de discusión con personal especializado para responder y sugerir soluciones.

4.3 Software de modelación y simulación OMNET++

OMNeT ++ es un marco de simulación de red de eventos discretos modular orientado a objetos. OMNET++ trabaja sobre arquitectura modular. Los módulos de red son ensamblados por medio de sub-módulos que son reutilizables y combinados de distintas maneras (Vargas, 2016). Los módulos de red se pueden conectarse con distintos módulos a través de puertos o *gates*, y combinarlos entre sí para formar nuevos módulos o módulos compuestos. Otra herramienta complementaria útil para el desarrollo del trabajo de investigación es SimuLTE para redes LTE, es una herramienta de simulación de redes LTE. También se utiliza INET Framework, la cual es una biblioteca de modelos TCP, UDP, IPv4, OSPF, BGP, protocolos de capa de enlace cableados e inalámbricos y muchos otros protocolos y componentes (Malik, Cortes, & Ayadi, 2015).

Los módulos son estructuras de datos jerárquicas escritas en lenguaje de programación NED, Network Description. Por medio de este lenguaje se declara los módulos y características del sub-módulo. Los módulos contienen parámetros que son utilizados para intercambiar información entre diferentes módulos. Los módulos simples son elementos activos que no se pueden dividir. Los módulos compuestos está formado por varios módulos simples (Ortiz Torres, 2011).

Por su parte el lenguaje NED, Network Description es quien permite al usuario describir la estructura del modelo de simulación, por medio de reglas sintácticas y semánticas. Los módulos compuestos, que son grupos de módulos simples que trabajan de manera conjunta. También es posible referirse a la red como un módulo compuesto (Morales, Calle, & Tovar, 2103, pág. 49)

4.4 Modelación de la red backhaul LTE

El modelo de red se crea a partir de una estructura funcional de red backhaul LTE. La porción de red backhaul, está ubicada en el sector rural de la ciudad de Quito, brinda servicio a la comuna de Llano Grande. La estructura de red es de tipo no ideal donde el despliegue de la tecnología es para pocos abonados en un área muy extendida. Sin embargo en los próximos años se prevé una tasa de crecimiento población debido a proyecciones de mejoramiento del trazado vial (Scholz, Morales, & Mena, 2015). La ubicación geográfica del eNB es 0°07'20.1", S 78°26'03.4"W, código de área LAC 14500, código País móvil MCC 740-Ecuador, código Operador móvil MNC1, identificación de la celda 131350049.

Para crear el modelo de red backhaul se requirió de componentes software. OMNET++ descargado de la página web oficial <https://www.omnetpp.org/>, INET Framework, descargado de la página oficial <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html> y SimuLTE de <http://simulte.com/index.html>. Desde la librería de SimuLTE se seleccionan los elementos característicos de la red que se describieron en el 2.4.2. El modelo de red a crear se muestra en la figura 7.

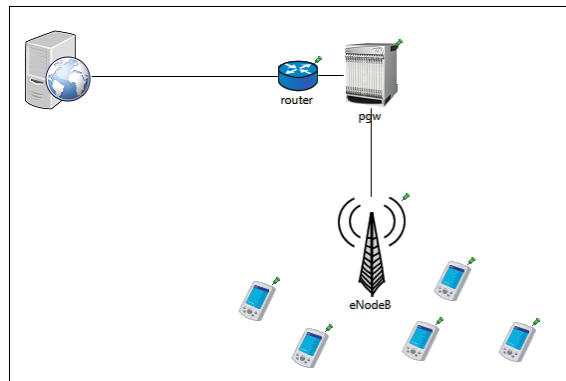


Figura 7. Porción de red backhaul LTE
Elaborado por: Santiago Alvaro

La naturaleza de red backhaul LTE soporta variedad de tráfico de datos. Video, audio, voz, streaming de video y audio, entre otros (Abdaelkader & Pérez, 2016). Sin embargo en el modelo a simular se define una estructura backhaul LTE que soporta streaming de video. La estructura de red es de tipo no ideal para zonas rurales, basado en un medio físico de ancho de banda limitado como se indica en la Tabla 7 del documento *TR36.932* del propio 3GPP.

Tabla 7. Categoría no ideal de backhaul

Backhaul Technology	Latency (One way)	Throughput
Fiber Access 1	10-30ms	10M-10Gbps
Fiber Access 2	5-10ms	100-1000Mbps
Fiber Access 3	2-5ms	50M-10Gbps
DSL Access	15-60ms	10-100 Mbps
Cable	25-35ms	10-100 Mbps
Wireless Backhaul	5-35ms	10Mbps – 100Mbps typical, maybe up to Gbps range

Referencia: (Luo & Zhang, 2016, pág. 501)

La Tabla 7 muestra la categorización del backhaul no ideal, este tipo de backhaul es típico y ampliamente utilizado.

Para la investigación se ha considerado solo tráfico streaming de video, debido a que este tipo de datos es el más ampliamente utilizado por medio de los equipos de usuario, según índices del mercado latino. En Ecuador el consumo de contenidos streaming es el 52% del tráfico total de la red de datos a través de plataformas como YouTube, Netflix, Spotify, Pandora, entre otras (Gomez, 2017).

4.4.1 Desarrollo del modelo de red backhaul LTE

Los elementos de red que se han considerado para la construcción del modelo de red backhaul LTE se muestran en la Tabla 8. Los módulos y sub-módulos se encuentran en la librería de SimuLTE de OMNET++.

Tabla 8. Módulos y sub-módulos de red

Módulo	Sub-Módulos
Servidor streaming	udpApp, udp, networkLayer, ppp[0]
Router	networkLayer, ppp[0], ppp[1]
P-GW	Ppp[0], networkLayer, udp, gtp_user, trafficFlowFilter, pppInterface
e-NB	Sctp, trafficFlowLayer, gtp_user, udp, networkLayer, pppIf
UE	Nic, networkLayer, udp, udpApp

Elaborado por: Santiago Alvaro

4.4.2 Descripción de los elementos de red

El modelo de red a simular consiste en módulos jerárquicamente anidados que se comunican entre sí a través de puertos de entrada /salida. Los módulos que forman la porción de red backhaul IP se detallan de la siguiente manera:

Servidor streaming: este elemento envía fotogramas de audio y video bajo demanda a través de internet dirigido a los equipos de usuario. Cada fotograma llega al UE en periodos regulares de tiempo, la trama está formado por segmentos que son enviados individualmente como paquetes.

Algo importante a tomar en cuenta es que los paquetes atraviesan la red de forma encapsula. El protocolo utilizado para esta función es UDP ofrece un servicio de transporte mínimo sin conexión, la entrega del datagrama no es garantizada (Networksorcery.com, 2012). El tipo de tráfico que se utiliza en la simulación corresponde a un video con 1 MiB de tamaño, resolución de 720p equivalente a 1280 x 720, con velocidad de 50 fotogramas por segundo equivalente a 1000kbps (Lista de modos straming y velocidades de fotograma, 2015), se escoge este formato debido a que es la resolución típica de los videos en los equipos de usuario (*Smartphones*). La variedad de resoluciones streaming se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Resolución streaming de video

Modo de streaming	Resolución	Códec	Velocidad de fotogramas	Velocidad de bits
[AVC-G6]	1920×1080* ¹	Video: H.264 High Profile Audio: AAC-LC 2ch	30 fps/25 fps	6 Mbps
	1280×720* ²		60 fps/50 fps	
[HQ]	640×360		30 fps/25 fps	1500 kbps
[LOW]	480×270	Video: H.264 Baseline Profile Audio: AAC-LC 2ch	30 fps/25 fps	800 kbps
[AVC-G]	1920×1080* ¹	Video: H.264 High Profile ; Audio: AAC-LC 2ch	30 fps/25 fps	Lado de recepción: variable según la aplicación, Máximo 9 Mbps
	1280×720* ²		60 fps/50 fps	
[SHQ (QoS)]	960×540	Video: H.264 High Profile ; Audio: AAC-LC 2ch	30 fps/25 fps	Lado de recepción: variable según la aplicación, Máximo 6 Mbps

Fuente: [https://pro-av.panasonic.net/manual/html/AJ-PX380G\(VQT5L72A-2\(S\)\)/chapter04_12_04.htm](https://pro-av.panasonic.net/manual/html/AJ-PX380G(VQT5L72A-2(S))/chapter04_12_04.htm)

El servidor espera las solicitudes de transmisión de video entrantes. Cuando llega una solicitud, del servidor se genera flujo de video, usando el parámetro *videoSize*, y comienza a transmitir a los UEs. Durante la transmisión, enviará paquetes UDP de tamaño *packetLen* en *sendInterval*, hasta que se alcance *videoSize*. Estos parámetros se encuentran definidos en la Tabla 10. La configuración de los parámetros del servidor se modifica en el archivo *UDPVideoStreamSvr.ned*.

Tabla 10. Parámetros del servidor streaming de video

Parámetro	Valor
Puerto de envío	3088
Intervalo de envío	20 ms
Longitud del paquete	1000B
Tamaño del video	1MiB

Elaborado por: Santiago Alvaro

El módulo servidor streaming de video está compuesto por un sub-módulos, *udpApp*, *udp*, *networkLayer* y *ppp*. Como se aprecia en la Figura 8.

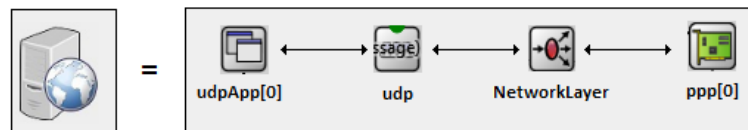


Figura 8. Módulo y sub-módulos que forman el Servidor streaming de video

Elaborado por: Santiago Alvaro

El sub-módulo *udpApp* es un bloque de aplicaciones UDP. El sub-módulo *udp* permite recibir y enviar datagramas UDP. El sub-módulo *ppp [0]* permite la conexión con el enrutador de borde entre la red EPC y la red externa. El sub-módulo *ppp* recibe paquetes de las capas superiores y los encapsula en tramas y los envía a la capa física a través de la interfaz. (INET Framework for OMNET++, 2016, pág. 16). La representación del módulo servidor streaming se muestra en la Figura 8.

El *módulo router*, mostrado en la Figura 9, es el elemento de capa tres que reenvía los paquetes entre redes distintas. El router tiene configurado dos módulos de red, uno que se comunica con el servidor streaming localizado en la red externa Internet por medio de *ppp [0]* y el otro módulo *ppp [1]* que se comunica con la red interna LTE. El router utiliza protocolo point to point para la conexión directa entre el servidor y el P-GW.

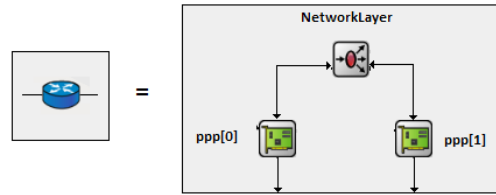


Figura 9. Módulo y sub-módulos que forman el Router

Elaborado por: Santiago Alvaro

El *sub-módulo networkLayer* del router contiene los módulos IP, ICMP, ARP e IGMP en un solo módulo compuesto. El módulo networkLayer define compuertas para conectar UDP, TCP, SCTP, RSVP y protocolos de transporte OSPF (INET Framework for OMNET++, 2016, pág. 80)

El *módulo P-GW*, de la Figura 10, contiene un sub-módulo ppp [0] para interconectarse con el router y el sub-módulo pppInterface el cual es un módulo compuesto de un módulo ppp y un módulo pasivo para encolar los mensajes recibidos de la capa de red (INET Framework for OMNET++, 2016, pág. 17).

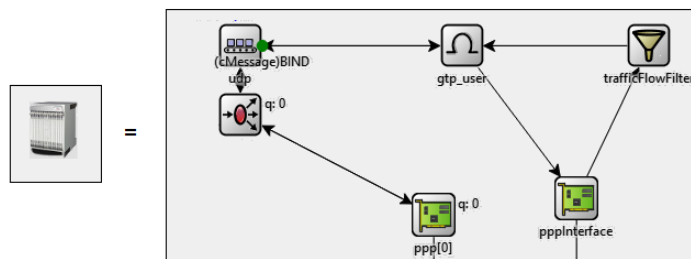


Figura 10. Módulo y sub-módulos que forman el P-GW

Elaborado por: Santiago Alvaro

Además contiene el módulo compuesto *networkLayer* y el módulo *gtp_user* que filtra paquetes de datos. Los paquetes que no cumplen con los criterios de filtrado se eliminan y el resto pasan a su destino. El módulo *gtp_user* verifica direcciones de origen, destino, máscaras, número de puerto UDP/TCP que sean consistentes con la versión GTP (General packet radio service tunneling protocol (GTP) packet filter, s.f.). El sub-módulo *trafficFlowFilter*, es un filtro de flujo de Tráfico que mapea direcciones IP, esto significa identificar un portador asociándolo a una identificación que será reconocida por la entidad *gtp_user*.

El *módulo eNodeB* está formado por sub-módulos descritos en los enunciados anteriores y complementados con una *nic* y *sctp*. La *nic Network Interface Card*, Tarjeta de Interfaz de Red, es un módulo adaptador de red que permite la conexión entre los UEs y la eNB para el flujo de tráfico ascendente y descendente (Obaidat, Kacprzyk, & Filipe, 2015, pág. 89).

SCTP Stream Control Transmisión Protocol, es el protocolo de capa de transporte. Este protocolo se utiliza para proporcionar entrega garantizada de mensajes a través de tráfico IP. Permite el intercambio de múltiples flujos de mensajes en una sola conexión sctp. En los mensajes de secuencia se puede establecer la conexión sctp, intercambio de datos sctp, adición de una nueva dirección IP a una conexión sctp, cambio de una nueva IP, eliminación de IP (Configuración de conexión SCTP, 2017). La representación de la e-Nb se muestra en la Figura 11.

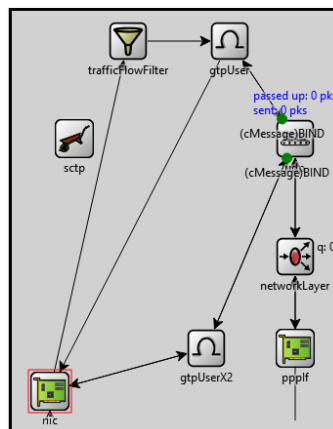


Figura 11. Módulo y sub-módulos que forman la e-NB

Elaborado por: Santiago Alvaro

UE *User Equipment*, equipo de usuario. El módulo *UE*, de la Figura 12, contiene un *sub-módulo udpApp* que es un bloque de aplicaciones TCP y/o UDP y modelan un comportamiento de usuario. Los ppp frames recibidos de la interfaz física se desencapsulan y se envían a la capa superior. En este caso la aplicación está configurada para simular comportamiento de usuario con demanda de streaming.

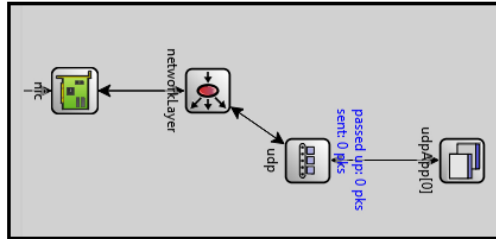


Figura 12. Módulo y sub-módulos que forman el equipo de usuario (UE)

Elaborado por: Santiago Alvaro

El sub-módulo udp se puede conectar a varias aplicaciones y cada aplicación puede usar varios sockets para enviar y recibir datagramas UDP (INET Framework for OMNET++, 2016, pág. 96)

4.4.3 Descripción de los medios físicos

Cada nodo en la red está identificado por un módulo, para las conexiones entre módulos se utiliza medios físicos. Los medio físicos más comunes puede ser desde cables coaxial, par trenzado hasta fibra óptica de varias categorías. Los estándares especificados con los que cuenta OMNET++, contienen la Ethernet clásica de 10 Mbps, 100Mbps Fast Ethernet, 1 Gbps Gigabit Ethernet y 10 Gbps Fast Gigabit Ethernet (INET Framework for OMNET++, 2016, pág. 20). La conexión física definida entre los nodos se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Medios físicos entre nodos

Equipo origen	Capacidad Medio físico	Equipo destino
Servidor streaming	10 Gbps	Router
Router	1 Gbps	P-GW
P-GW	10 Mbps	e-NB

Elaborado por: Santiago Alvaro

La capacidad de canal entre el P-GW y e-NB es de 10Mbps, esto se debe a que para el caso de estudio de la red backhaul LTE el ancho de banda es limitado. Considerando que el propio 3GPP indica en TR36.932 que puede coexistir dos tipos de infraestructura backhaul.

El tipo 1, el caso ideal basado en *fibra óptica* y el tipo 2, no ideal compuesto *por DSL y enlaces microondas*, que es el caso de las zonas rurales o espacios turísticos ubicados a kilómetros de

distancia del nodo óptico más cercano. Entre el Router y P-GW se utiliza la norma Gigabit Ethernet, fibra óptica de 1 Gbps, con una distancia máxima de 25 m. Entre el P-GW y el e-NB se utiliza la norma *10baseFL*, que brinda un ancho de banda teórico de 10 Mbps para enlace punto a punto de estaciones o repetidores hasta 2 Km, mediante fibra óptica. A continuación se muestra las líneas de programación para definir los medios físicos entre los nodos.

```

package inet.node.ethernet;
import ned.DatarateChannel;

channel Eth10M extends EtherLink
{
    datarate = 10Mbps;
}

// 1 gigabit/sec Ethernet link
//
channel Eth1G extends EtherLink
{
    datarate = 1Gbps;
}

// 10 gigabit/sec Ethernet link
//
channel Eth10G extends EtherLink
{
    datarate = 10Gbps;
}

```

Elaborado por: Santiago Alvaro

4.4.4 Definición de características técnicas de la e-Nb y UE

Las características técnicas de movilidad, ubicación, potencia de transmisión y tiempo de conexión, que definen al UE se muestran en la Tabla 12. La información que contienen las siguientes tablas de parámetros son recomendaciones establecida por la ITU M.2135-1 para *Suburban macro-cell* las cuales define las características técnicas que tiene la e-Nb y los UEs.

Tabla 12. Parámetros del equipo de usuario

Movilidad	Aleatoria
Ubicación	Aire libre
Potencia de transmisión	24[dBm]
Tiempo de conexión a la red	10 [s]

Elaborado por: Santiago Alvaro

Por parte de la e-NB las características técnicas que lo definen se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros de e-NB

Movilidad	Estática
Ubicación	0°07'20.1"S 78°26'03.4"W
Altura	25[m]
Potencia Suburban	49 [dBm]
Cobertura	Hexagonal
Ganancia antena	17 [dBi]

Elaborado por: Santiago Alvaro

4.4.5 Configuración del entorno gráfico

En el apartado 4.4 se detalla las características y funcionalidades de cada elemento que forma la porción de red backhaul. En el siguiente paso se establece el entorno gráfico del escenario de prueba, en OMNET++. Para ello se desarrolla las líneas de programación en lenguaje NED. El archivo que contiene la programación del entorno de simulación en el archivo *SingleCell.numUE.NED*, el cual se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Líneas de programación que definen el escenario principal

```
// Líneas del programa principal
//
package lte.simulations.networks;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.networklayer.ipv4.RoutingTableRecorder;
import inet.node.ethernet.Eth10G;
import inet.node.ethernet.Eth1G;
import inet.node.ethernet.Eth10M;
import inet.node.inet.Router;
import lte.corenetwork.nodes.eNodeB;
import lte.epc.PgwStandardSimplified;

network SingleCell
{
  parameters:
    int numUe = default(1);
    @display("i=block/network2;bgb=991,558;bg=background/budapest");

  submodules:
    server: StandardHost {
      @display("p=212,118;is=n;i=device/server");
    }
}
```

```
router: Router {
  @display("p=321,136;i=device/smallrouter");
}
pgw: PgwStandardSimplified {
  nodeType = "PGW";
  @display("p=519,175;is=1");
}
eNodeB: eNodeB {
  @display("p=391,259;is=v1");
}
ue[numUe]: Ue {
  @display("p=783,278");
}
connections:
server.pppg++ <--> Eth10G <--> router.pppg++;
router.pppg++ <--> Eth1G <--> pgw.filterGate;
pgw.pppg++ <--> Eth10M <--> eNodeB.ppp;
}
```

Elaborado por: Santiago Alvaro

Estas líneas de programación, son la parte principal del archivo *SingleCell.numUE.NED*. Allí se declara los sub-módulos que contiene la red, como el servidor streaming, router, pgw, eNodeB, UEs, con sus vectores de posición. También se declara los tipos de conexiones entre los sub-módulos. Además se define el fondo gráfico que tendrá el escenario de simulación. Y lo más importante se define las librerías para que los sub-módulos funcionen con normalidad.

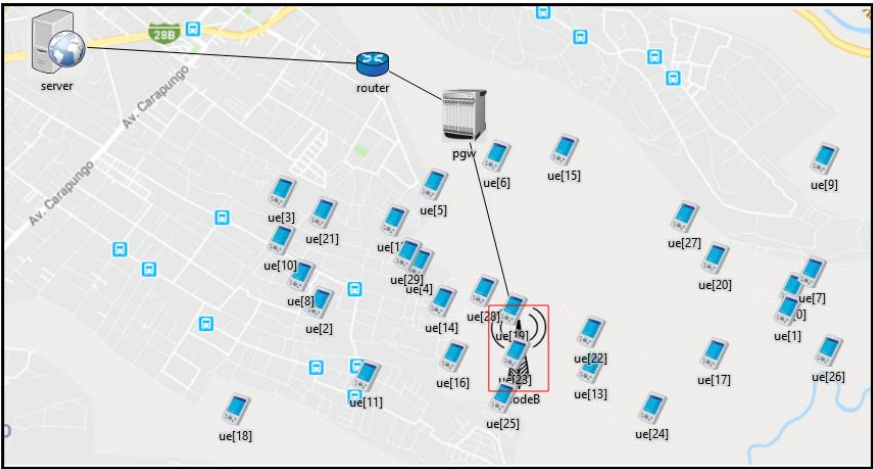


Figura 13. Entorno gráfico del modelo de red backhaul LTE

Elaborado por: Santiago Alvaro

4.5 Escenarios de prueba

A partir del modelo de red backhaul LTE se derivan los escenarios de simulación. Los escenarios consisten en mantener la estructura de red y variar el número de equipos de usuario. El primer escenario de simulación tiene 31 equipos terminales que corresponde al promedio de conexiones no simultáneas que soporta el E-NB en el transcurso del día pero que para propósitos de la investigación y acogiendo las recomendaciones del libro *Mobile Backhaul*, se asume una demanda simultánea de los equipos de usuario. El número de conexiones promedio que soporta el E-NB es proporcionado por personal técnico de la operadora de servicios cuya información es de carácter extraoficial debido al acuerdo confidencial que maneja la empresa.

Para determinar el desempeño de red se consideró la mayor carga de tráfico en cada escenario, esto ocurre cuando todos los abonados demandan simultáneamente streaming de video. Los siguientes escenarios tienen 38, 45 y 52 equipos terminales. Este incremento corresponde al índice de penetración de LTE en América Latina sobre la utilización de los Smartphone en la red LTE (CEPAL, 2016, pág. 50). El número de simulaciones definido por cada escenario es de 36, tal como se demostró en el apartado 3.9 del capítulo de metodología de la investigación.

El número de simulaciones representa la periodicidad más significativa de la carga de tráfico en dos meses que presenta la red backhaul LTE. Cada simulación tendrá una duración de 10 segundos en el simulador, este tiempo representa la coincidencia de utilización de todos los equipos de usuario que se conectan a la red backhaul LTE en un momento determinado del día. (Metsala & Salmelin, 2016, pág. 46). Cada simulación en tiempo real tiene una duración de 20 a 30 minutos.

El tráfico a considerar para las pruebas en los escenarios de simulación es video streaming, debido a que este tipo de tráfico es el de que mayor crecimiento en los próximos años según el reporte de *Global of internet* en la página www.pcworld.com.

La red backhaul LTE a modelar tiene interés en el plano de usuario, es decir solo se toma en cuenta el tráfico de datos sin considerar plano de control. Esto se debe a que si se considera el plano de control, la red simulada manejará muchos mensajes de autenticación por equipo de usuario lo que implicaría mayor capacidad de procesamiento por el computador y más tiempo de simulación.

La forma en que se procede para evaluar el desempeño de red, se fundamenta en las recomendaciones del documento *RFC 2544 de la IETF* el cual define al *Frame Loss Rate*, Porcentaje de Tramas Perdidas (Bradner G. d., 1999), como parámetro que permite evaluar elementos de red conectados de forma directa, punto a punto.

Los escenarios de simulación propuestos se muestran en la Figura 14.

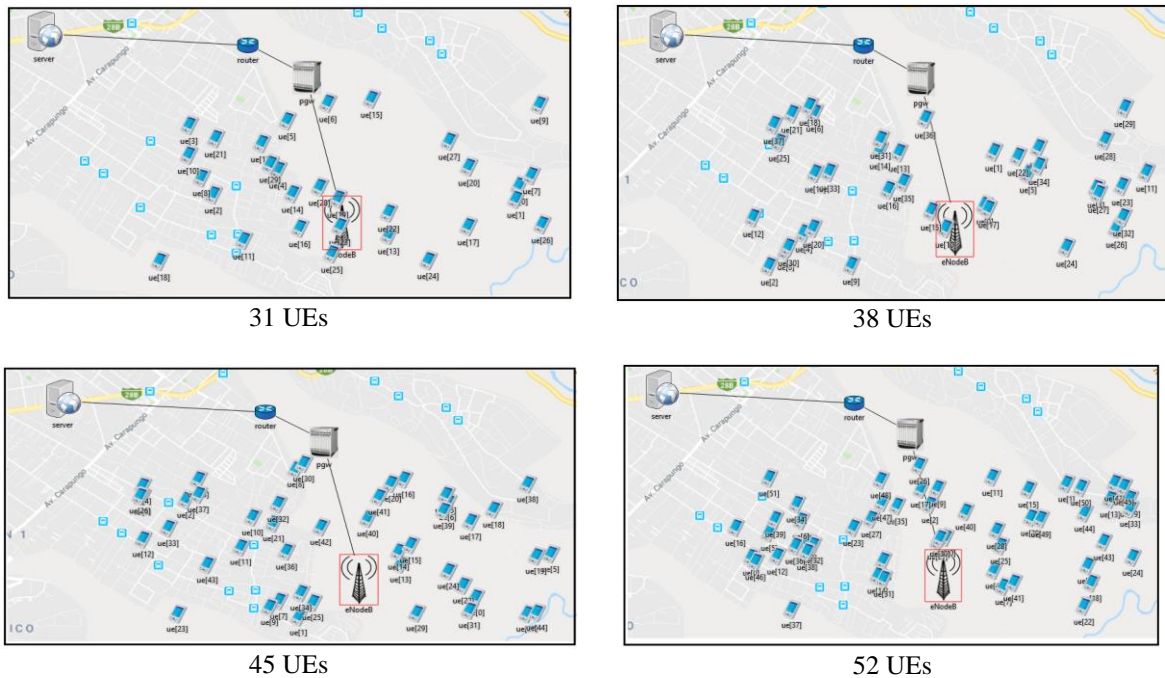


Figura 14. Escenarios de simulación de la red backhaul LTE

Elaborado por: Santiago Alvaro

Los entornos de prueba están organizados de la siguiente manera: En el primer escenario de pruebas, la demanda de tráfico de video streaming satisface a 31 UEs que se conectan a la red de forma simultánea, el segundo escenario de pruebas se valida sobre el primer escenario aumentando el número de UEs a 38, el tercer escenario de pruebas se valida sobre el segundo escenario aumentando el número de UEs a 45 y el cuarto escenario se valida sobre el tercer escenario, incrementando el número de UEs a 52.

El proceso de conexión entre el usuario y servidor se inicia con la comunicación entre el UE *User Equipment* y el eNB *envolved NodeB* a través de una interfaz de radio enlace. El eNB envía la información a través de la interfaz de usuario al P-GW. Esta información está compuesta por una

cabecera IP y la data. En la cabecera IP se aloja la dirección IP de los equipos de usuario y la dirección IP destino del servidor, demandando streaming de video. El servidor streaming de video envía un número específico de fotogramas a una tasa específica de transferencia que son entregados a los equipos de usuario.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de resultados, producto de las simulaciones efectuadas a los escenarios de prueba. También se realiza la demostración de la hipótesis, se formaliza las conclusiones y recomendaciones.

5.1 Procedimiento para análisis de resultados

En los escenarios de prueba se evalúa la pérdida de paquetes que presenta la red backhaul LTE, el documento *RFC 2544 de la IETF* define una serie de pruebas que se utiliza para describir el desempeño de una red, entre ellas está *la tasa de paquetes perdidos* (Bradner G. d., 1999).

La tasa de paquetes perdidos, es el parámetro que se toma en cuenta en esta investigación para determinar el desempeño de la red backhaul LTE. La razón por la cual se eligió este parámetro se debe a que el servicio que ofrece la red es streaming de video visualizada por el usuario y explícitamente por el ojo humano, el cual no percibe distorsión si solo se pierde un número bajo de paquetes consecutivos. Cuando el número de paquetes perdidos se incrementa, percibe distorsión o hasta interrupción en la reproducción del video. Este parámetro es el más adecuado para la investigación ya que ofrece una medida objetiva de la percepción del video por parte del usuario y mediante la cuantificación directa en la simulación se puede establecer el número de paquetes enviados y recibidos en cada nodo y enlace.

El procedimiento establecido para el análisis de resultados en los escenarios de prueba, se fundamenta en verificar el número de paquetes enviados por el servidor streaming de video, realizar un recuento de los paquetes que llegan a cada nodo de la red. Los nodos de la red son, el router, P-GW, e-NB. Si en el recuento se reciben menos paquetes de los enviados, establecer el porcentaje de paquetes perdidos a partir de la siguiente formula:

$$FLR = \frac{|Paq. Env - Paq. Rec| * 100}{Paq. Env}$$

Dónde:

Paq.Env, es el número de paquetes enviados

Paq.Rec, es el número de paquetes recibidos

FLR, es Frame Loss Rate. (Avilés & Pachacama, 2015, pág. 13)

5.2 Resultados de las simulaciones en el primer escenario

La porción de red backhaul LTE a simular está integrado por un servidor streaming de video, router, P-GW, e-NB y 31 equipos de usuario consumiendo video bajo demanda, como se muestra en la Figura 15. El servidor streaming de video envía paquetes de información a los usuarios de forma simultánea.

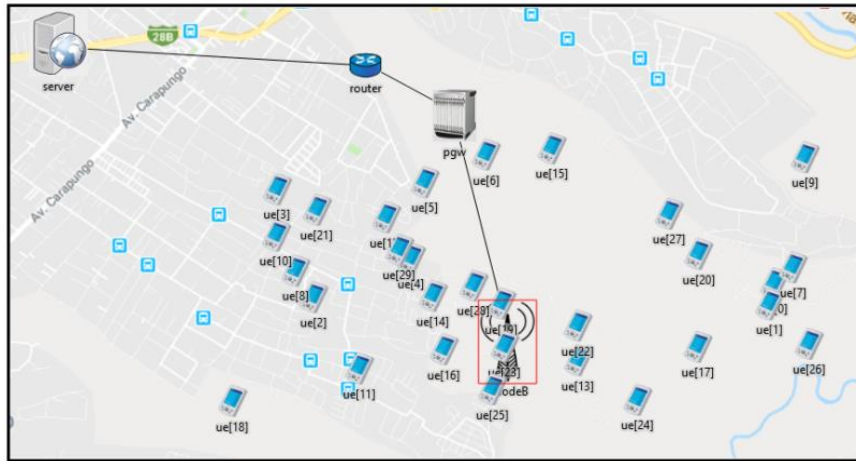


Figura 15. Porción de red backhaul LTE

Elaborado por: Santiago Alvaro

Al primer escenario de pruebas se realizó 36 simulaciones, cada simulación tuvo una duración de 20 minutos, el tiempo invertido para la recolección total de datos fue de 720 minutos. En la Tabla 14 se muestra los resultados obtenidos de las simulaciones, allí se identifica el número de paquetes que envía el servidor streaming hasta el eNB, pasando por el router, P-GW y sus enlaces intermedios. El enlace entre el router y el P-GW tiene una capacidad de 1Gbps y el enlace entre el P-GW y la e-NB tiene una capacidad de 10 Mbps.

Tabla 14. Resultados obtenidos de las simulaciones del primer escenario de pruebas

Primer escenario de simulación							
Simulación [veces]	Tiempo de simulación [s]	Server	Router		P-GW		e-NB
		Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]
1	10	12791	12791	12786	12786	12783	12036
2	10	12490	12490	12485	12485	12482	11735
3	10	12497	12497	12492	12492	12489	11742
4	10	12550	12550	12545	12545	12542	11795

5	10	12784	12784	12779	12779	12776	12029
6	10	12699	12699	12694	12694	12691	11944
7	10	12793	12793	12788	12788	12785	12038
8	10	13917	13917	13912	13912	13909	13162
9	10	12705	12705	12700	12700	12697	11950
10	10	13042	13042	13037	13037	13034	12287
11	10	12495	12495	12490	12490	12487	11740
12	10	12756	12756	12751	12751	12748	12001
13	10	12705	12705	12700	12700	12697	11950
14	10	12811	12811	12806	12806	12803	12056
15	10	12645	12645	12640	12640	12637	11890
16	10	12712	12712	12707	12707	12704	11957
17	10	12481	12481	12476	12476	12473	11726
18	10	12690	12690	12685	12685	12682	11935
19	10	12937	12937	12932	12932	12929	12182
20	10	12594	12594	12589	12589	12586	11839
21	10	12517	12517	12512	12512	12509	11762
22	10	12660	12660	12655	12655	12652	11905
23	10	12780	12780	12775	12775	12772	12025
24	10	12714	12714	12709	12709	12706	11959
25	10	12682	12682	12677	12677	12674	11927
26	10	12691	12691	12686	12686	12683	11936
27	10	12759	12759	12754	12754	12751	12004
28	10	12707	12707	12702	12702	12699	11952
29	10	12612	12612	12607	12607	12604	11857
30	10	12654	12654	12649	12649	12646	11899
31	10	12757	12757	12752	12752	12749	12002
32	10	12733	12733	12728	12728	12725	11978
33	10	12555	12555	12550	12550	12547	11800
34	10	12819	12819	12814	12814	12811	12064
35	10	12642	12642	12637	12637	12634	11887
36	10	12445	12445	12440	12440	12437	11690
Promedio	10	12717	12717	12712	12712	12709	11962

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

5.3 Resultados de las simulaciones en el segundo escenario

La porción de red backhaul LTE a simular está integrado por un servidor streaming de video, router, P-GW, e-NB y 38 equipos de usuario consumiendo video bajo demanda. El servidor streaming de video envía paquetes de información a los usuarios de forma simultánea. Al segundo escenario de pruebas se realizó 36 simulaciones, cada simulación tuvo una duración de 23 minutos, el tiempo invertido para la recolección total de datos fue de 828 minutos. En la Tabla 15 se muestra los resultados obtenidos de las simulaciones, allí se identifica el número de paquetes que envía el servidor streaming hasta el eNB, pasando por el router, P-GW y sus enlaces intermedios. El enlace entre el router y el P-GW tiene una capacidad de 1Gbps y el enlace entre el P-GW y la e-NB tiene una capacidad de 10 Mbps.

Tabla 15. Información recopilada de las simulaciones del segundo escenario de pruebas

Segundo escenario de simulación							
Simulación [veces]	Tiempo de simulación [s]	Server	Router		P-GW		e-NB
		Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]
1	10	17529	17529	17521	17521	17513	11702
2	10	17814	17814	17806	17806	17798	11987
3	10	17754	17754	17746	17746	17738	11927
4	10	17943	17943	17935	17935	17927	12116
5	10	17899	17899	17891	17891	17883	12072
6	10	17660	17660	17652	17652	17644	11833
7	10	17881	17881	17873	17873	17865	12054
8	10	17576	17576	17568	17568	17560	11749
9	10	17720	17720	17712	17712	17704	11893
10	10	17837	17837	17829	17829	17821	12010
11	10	17860	17860	17852	17852	17844	12033
12	10	18891	18891	18883	18883	18875	13064
13	10	17659	17659	17651	17651	17643	11832
14	10	17682	17682	17674	17674	17666	11855
15	10	17671	17671	17663	17663	17655	11844
16	10	17604	17604	17596	17596	17588	11777
17	10	17794	17794	17786	17786	17778	11967
18	10	16632	16632	16624	16624	16616	10805
19	10	17709	17709	17701	17701	17693	11882
20	10	17943	17943	17935	17935	17927	12116
21	10	17770	17770	17762	17762	17754	11943
22	10	17825	17825	17817	17817	17809	11998
23	10	17709	17709	17701	17701	17693	11882
24	10	18141	18141	18133	18133	18125	12314
25	10	17814	17814	17806	17806	17798	11987
26	10	17639	17639	17631	17631	17623	11812
27	10	17954	17954	17946	17946	17938	12127
28	10	17669	17669	17661	17661	17653	11842
29	10	18669	18669	18661	18661	18653	12842
30	10	17837	17837	17829	17829	17821	12010
31	10	16432	16432	16424	16424	16416	10605
32	10	17783	17783	17775	17775	17767	11956
33	10	17682	17682	17674	17674	17666	11855
34	10	17825	17825	17817	17817	17809	11998
35	10	17576	17576	17568	17568	17560	11749
36	10	17811	17811	17803	17803	17795	11984
Promedio	10	17755	17755	17747	17747	17739	11928

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

5.4 Resultados de las simulaciones en el tercer escenario

La porción de red backhaul LTE a simular está integrada por un servidor streaming de video, router, P-GW, e-NB y 45 equipos de usuario consumiendo video bajo demanda. El servidor streaming de video envía paquetes de información a los usuarios de forma simultánea. Al tercer escenario de pruebas se realizó 36 simulaciones, cada simulación tuvo una duración de 26 minutos, el tiempo invertido para la recolección total de datos fue de 936 minutos. En la Tabla 16 se muestra los resultados obtenidos de las simulaciones, allí se identifica el número de paquetes que envía el servidor streaming hasta el eNB, pasando por el router, P-GW y sus enlaces intermedios. El enlace entre el router y el P-GW tiene una capacidad de 1Gbps y el enlace entre el P-GW y la e-NB tiene una capacidad de 10 Mbps.

Tabla 16. Información recopilada de las simulaciones del tercer escenario de pruebas

Tercer escenario de simulación							
Simulación [veces]	Tiempo de simulación [s]	Server	Router		P-GW		e-NB
		Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]
1	10	20673	20673	20661	20660	20652	11880
2	10	20592	20592	20580	20579	20571	11799
3	10	20425	20425	20413	20412	20404	11632
4	10	20421	20421	20409	20408	20400	11628
5	10	20728	20728	20716	20715	20707	11935
6	10	20559	20559	20547	20546	20538	11766
7	10	20840	20840	20828	20827	20819	12047
8	10	20728	20728	20716	20715	20707	11935
9	10	21152	21152	21140	21139	21131	12359
10	10	20773	20773	20761	20760	20752	11980
11	10	21004	21004	20992	20991	20983	12211
12	10	20690	20690	20678	20677	20669	11897
13	10	19939	19939	19927	19926	19918	11146
14	10	20541	20541	20529	20528	20520	11748
15	10	20668	20668	20656	20655	20647	11875
16	10	20709	20709	20697	20696	20688	11916
17	10	21171	21171	21159	21158	21150	12378
18	10	20373	20373	20361	20360	20352	11580
19	10	20228	20228	20216	20215	20207	11435
20	10	20109	20109	20097	20096	20088	11316
21	10	20841	20841	20829	20828	20820	12048
22	10	20243	20243	20231	20230	20222	11450
23	10	21004	21004	20992	20991	20983	12211
24	10	20323	20323	20311	20310	20302	11530
25	10	20593	20593	20581	20580	20572	11800
26	10	20509	20509	20497	20496	20488	11716
27	10	20706	20706	20694	20693	20685	11913
28	10	20703	20703	20691	20690	20682	11910

29	10	20692	20692	20680	20679	20671	11899
30	10	20425	20425	20413	20412	20404	11632
31	10	20698	20698	20686	20685	20677	11905
32	10	20683	20683	20671	20670	20662	11890
33	10	21004	21004	20992	20991	20983	12211
34	10	20444	20444	20432	20431	20423	11651
35	10	20821	20821	20809	20808	20800	12028
36	10	20559	20559	20547	20546	20538	11766
Promedio	10	20627	20627	20615	20614	20606	11834

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

5.5 Resultados de las simulaciones en el cuarto escenario

La porción de red backhaul LTE a simular está integrada por un servidor streaming de video, router, P-GW, e-NB y 52 equipos de usuario consumiendo video bajo demanda. El servidor streaming de video envía paquetes de información a los usuarios de forma simultánea. Al cuarto escenario de pruebas se realizó 36 simulaciones, cada simulación tuvo una duración de 30 minutos, el tiempo invertido para la recolección total de datos fue de 1080 minutos.

En la Tabla 17 se muestra los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas al cuarto escenario, allí se identifica el número de paquetes que envía el servidor streaming hasta el eNB, pasando por el router, P-GW y sus enlaces intermedios. El enlace entre el router y el P-GW tiene una capacidad de 1Gbps y el enlace entre el P-GW y la e-NB tiene una capacidad de 10 Mbps.

Tabla 17. Información recopilada de las simulaciones del cuarto escenario de pruebas

Cuarto escenario de simulación							
Simulación [veces]	Tiempo de simulación [s]	Server	Router		P-GW		e-NB
		Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]	Enviados [Paquetes]	Recibidos [Paquetes]
1	10	22706	22706	22689	22687	22676	11805
2	10	22848	22848	22831	22829	22818	11947
3	10	22772	22772	22755	22753	22742	11871
4	10	23622	23622	23605	23603	23592	12721
5	10	22645	22645	22628	22626	22615	11744
6	10	22490	22490	22473	22471	22460	11589
7	10	22780	22780	22763	22761	22750	11879
8	10	23172	23172	23155	23153	23142	12271

9	10	22980	22980	22963	22961	22950	12079
10	10	22673	22673	22656	22654	22643	11772
11	10	22589	22589	22572	22570	22559	11688
12	10	23127	23127	23110	23108	23097	12226
13	10	22755	22755	22738	22736	22725	11854
14	10	22538	22538	22521	22519	22508	11637
15	10	22915	22915	22898	22896	22885	12014
16	10	23358	23358	23341	23339	23328	12457
17	10	22755	22755	22738	22736	22725	11854
18	10	22583	22583	22566	22564	22553	11682
19	10	22764	22764	22747	22745	22734	11863
20	10	22621	22621	22604	22602	22591	11720
21	10	23172	23172	23155	23153	23142	12271
22	10	22715	22715	22698	22696	22685	11814
23	10	23127	23127	23110	23108	23097	12226
24	10	22755	22755	22738	22736	22725	11854
25	10	22807	22807	22790	22788	22777	11906
26	10	22755	22755	22738	22736	22725	11854
27	10	22755	22755	22738	22736	22725	11854
28	10	22538	22538	22521	22519	22508	11637
29	10	23172	23172	23155	23153	23142	12271
30	10	22710	22710	22693	22691	22680	11809
31	10	22755	22755	22738	22736	22725	11854
32	10	23127	23127	23110	23108	23097	12226
33	10	22663	22663	22646	22644	22633	11762
34	10	23018	23018	23001	22999	22988	12117
35	10	22206	22206	22189	22187	22176	11305
36	10	22980	22980	22963	22961	22950	12079
Promedio	10	22832	22832	22815	22813	22802	11931

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Los datos recuperados de las simulaciones permitirán examinar el efecto del tráfico de video streaming sobre la red backhaul LTE, para ello se realiza el siguiente análisis estadístico.

5.6 Análisis estadístico de resultados

Para el análisis estadístico se toma en cuenta los resultados obtenidos en las cuatro simulaciones. Se define los paquetes de información que recibe y envía cada nodo, cada enlace por cada escenario y se contrastar los resultados para establecer criterios.

Tabla 18. Estadísticos descriptivos de paquetes enviados por el Servidor, por escenario

	Paquetes enviados por el servidor			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Escenario 1	12.717	13.917	12.445	243
Escenario 2	17.755	18.891	16.432	403
Escenario 3	20.627	21.171	19.939	273
Escenario 4	22.832	23.622	22.206	274

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

De acuerdo a la Tabla 18, a medida que se incrementa el número de UEs representado por el número de escenario, aumenta el número de paquetes que envía el servidor, por lo que, su media también tiende a tener un comportamiento creciente, sin embargo, en la desviación estándar no se observa éste comportamiento, en el escenario 2 se observa una mayor dispersión que el escenario 1, y en el escenario 3 se observa una menor dispersión que el escenario precedente.

Tabla 19. Estadísticos descriptivos de los paquetes recibidos por el Router, por escenario

	Paquetes recibidos por el Router			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Escenario 1	12.717	13.917	12.445	243
Escenario 2	17.755	18.891	16.432	403
Escenario 3	20.627	21.171	19.939	273
Escenario 4	22.832	23.622	22.206	274

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

En relación a los paquetes recibidos por el Router, en la Tabla 19 se observa que, a medida que incrementa el número de UEs representado por el número de escenario, también aumenta el número de paquetes que recibe el Router, por ende, su media también tiene el mismo comportamiento, sin embargo, la desviación estándar tiene una tendencia contradictoria, puesto que, se observa una mayor dispersión en el escenario 2 comparado con los demás escenarios.

Tabla 20. Estadísticos descriptivos de los paquetes enviados por el Router, por escenario

	Paquetes enviados por el Router			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Escenario 1	12.712	13.912	12.440	243
Escenario 2	17.747	18.883	16.424	403
Escenario 3	20.615	21.159	19.927	273
Escenario 4	22.815	23.605	22.189	274

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Se evidencia en la Tabla 20, que a mayor número de UEs se incrementa el número de paquetes que envía el Router, teniendo este mismo comportamiento su media, sin embargo, la desviación estándar tiene un comportamiento diferente, ya que se observa que en el escenario 2 existe una mayor dispersión que los demás escenarios.

Tabla 21. Estadísticos descriptivos de los paquetes recibidos por el PGW, por escenario

	Paquetes recibidos por el PGW			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Escenario 1	12.712	13.912	12.440	243
Escenario 2	17.747	18.883	16.424	403
Escenario 3	20.614	21.158	19.926	273
Escenario 4	22.813	23.603	22.187	274

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Sobre el número de paquetes recibidos por el PGW, la Tabla 21 muestra que, el aumento de UEs, provoca un incremento en el número de paquetes PGW recibidos, es decir, su media tiene un comportamiento creciente, sin embargo, la desviación estándar no tiene el mismo comportamiento, debido a que, en el escenario 2 se observa la mayor dispersión.

Tabla 22. Estadísticos descriptivos de los paquetes enviado por el PGW, por escenario

	Paquetes enviados por el PGW			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Escenario 1	12.709	13.909	12.437	243
Escenario 2	17.739	18.875	16.416	403
Escenario 3	20.606	21.150	19.918	273
Escenario 4	22.802	23.592	22.176	274

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

A diferencia de los paquetes PGW recibidos, la cantidad de paquetes enviados es menor, y éstos tienden a tener un comportamiento creciente a medida que incrementa el UEs, observándose, en el escenario 2, un mayor número de dispersión de los paquetes en relación a su media, tal como se aprecia en la Tabla 22.

Tabla 23. Estadísticos descriptivos de los paquetes recibidos por la e-Nb, por escenario

	Paquetes recibidos por el e-NB			
	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Escenario 1	11.962	13.162	11.690	243
Escenario 2	11.928	13.064	10.605	403
Escenario 3	11.834	12.378	11.146	273
Escenario 4	11.931	12.721	11.305	274

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Finalmente, en la Tabla 23 se muestra los paquetes recibidos por la e-NB, se observa un comportamiento cíclico, a diferencia del comportamiento creciente de las demás elementos analizados, es decir, en el escenario 3 se observa que su media es menor a la del escenario 2, y la del escenario 4 resulto ser mayor que la del escenario 3, es decir, no se ve afectada por el incremento del número de UEs, sin embargo, la dispersión tiene el mismo comportamiento que la obtenida en las variables antes analizados, observando así, que en el escenario 2 existe la mayor dispersión.

5.6.1 Análisis del número de paquetes perdidos a lo largo de la transmisión en la red

A continuación en la Tabla 24, se muestra de manera resumida, el número de paquetes enviados por el servidor de streaming en cada escenario de simulación así como también el número de paquetes perdidos en todo el trayecto de red LTE.

Tabla 24. Tasa de paquetes pedidos en todo el trayecto de red

Escenario	Número de equipos de usuario	Paquetes promedio enviados por el servidor	Paquetes promedio recibidos en el E-NB	Paquetes promedio perdidos en la red
1	31	12717	11962	755
2	38	17755	11928	5827
3	45	20627	11834	8793
4	52	22832	11931	10901

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Para mejorar la interpretación de resultados obtenidos en el proceso de simulación se presenta la Tabla 25, la cual muestra el número de paquetes perdidos en cada enlace y elemento de red.

Tabla 25. Paquetes perdidos por cada elemento de red y enlace

Escenario	Paquetes perdidos enlace Server-Router	Paquetes perdidos en el Router	Paquetes perdidos enlace Router-PGW	Paquetes perdidos en PGW	Paquetes perdidos enlace PGW-eNB
1	0	5	0	3	747
2	0	8	0	8	5811
3	0	12	1	8	8772
4	0	17	2	11	10871

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Según la Tabla 25, en el escenario 1 se pierden en promedio 5 paquetes en el Router, en el PGW se pierden 3 paquetes; sin embargo en la transmisión entre el PGW y el E-NB, se pierden 747 paquetes de información. En el escenario 2, en promedio, se pierden 8 paquetes en el Router, en el PGW se

pierden 8 paquetes; sin embargo en la transmisión entre el PGW y el E-NB, se pierden 5811 paquetes de información. En el escenario 3, en promedio, se pierden 12 paquetes en el Router, en la transmisión entre el Router y P-GW se pierde 1 paquete, en el PGW se pierden 8 paquetes; sin embargo en la transmisión entre el PGW y el E-NB, se pierden 8772 paquetes de información. En el escenario 4, en promedio, se pierden 17 paquetes en el Router, en la transmisión entre el Router y P-GW se pierde 2 paquetes, en el PGW se pierden 11 paquetes; sin embargo en la transmisión entre el PGW y el E-NB, se pierden 10871 paquetes de información.

Al observar los promedios de paquetes perdidos en la transmisión desde el PGW al eNB, se aprecia que este representa el paso más crítico de toda la transmisión. Con 31 UEs se pierde un promedio de 755 paquetes. En la medida en que se agregan más equipos de usuario las pérdidas se incrementan. En el escenario 2 se pierde el 5811 paquetes, mientras que en el escenario 3 las pérdidas de paquetes son 8772 y, finalmente, en el escenario 4 se pierden 10871 paquetes. En la Figura 16 se muestra la interpretación grafica de los datos mostrados en la Tabla 25. En la Figura 16 el *eje x* representa los escenarios de simulación y el *eje y* representa el número de paquetes enviados y perdidos.

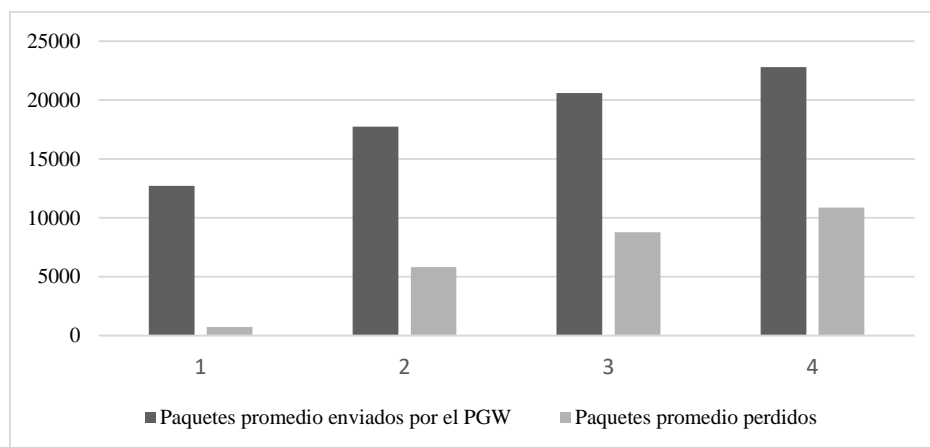


Figura 16. Paquetes enviados PGW y paquetes recibidos E-NB

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Álvaro

Para determinar la tasa de paquetes perdidos, se toma en cuenta el número de paquetes enviados por el PGW y el número de paquetes recibidos por el E-NB, a través de la siguiente formula:

$$FLR = \frac{|Paq. Enviados - Paq. Recibidos| * 100}{Paq. Enviados}$$

Tabla 26. Tasa de paquetes perdidos en el backhaul LTE

Escenario	Número de equipos de usuario	Paquetes promedio enviados por el PGW	Paquetes promedio recibidos por el E-NB	Tasa de paquetes perdidos en el backhaul LTE [%]
1	31	12709	11962	5,88
2	38	17739	11928	32,76
3	45	20606	11834	42,57
4	52	22802	11931	47,68

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La representación gráfica de la tasa de paquetes perdidos en función del número de equipos conectados en la red, se muestra en la Figura 17. En la Figura, el eje *y* representa la tasa de paquetes perdidos y el eje *x* representa el número de equipos de usuario.

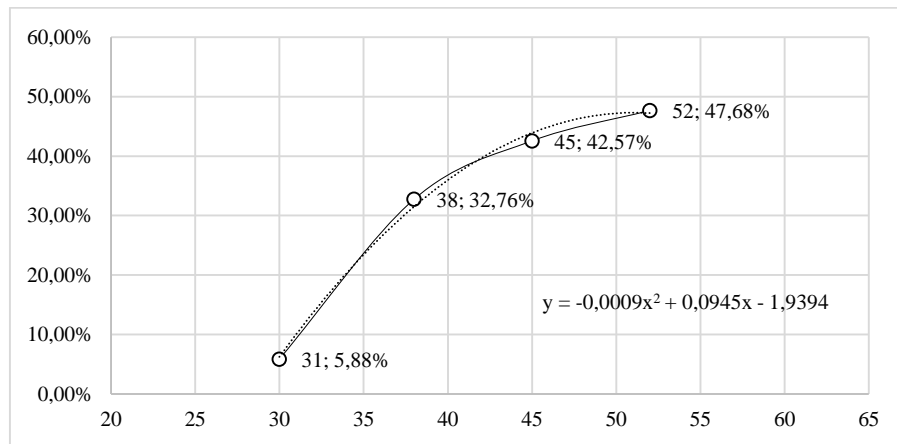


Figura 17. Tasa de paquetes perdidos en la transmisión de la red backhaul (*eje y*) vs UEs (*eje x*)

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Álvaro

Al aplicar la herramienta de estimación de tendencia polinómica de MS-Excel, se puede realizar la estimación aproximada de las pérdidas que representa la incorporación de equipos (UEs) en la red. Considerando que en el escenario 2 se incorporaron 8 nuevos UEs, en el escenario 3 se agregaron 7

UEs y en el escenario 4 hubo una adición de 7 equipos, se establece la ecuación polinómica que describe la tasa de paquetes perdidos. A través de esta ecuación se logra estimar que en escenarios con menor número de UEs, el porcentaje de paquetes perdidos disminuye, tal como se describe en la Tabla 27.

Tabla 27. Estimación de la tasa de paquetes perdidos en escenarios con menor número de UEs

	Escenario			Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Equipos de usuario	27	28	29	31	38	45	52
Tasa de paquetes perdidos	0,00%	<1%	2,32%	5,90%	32,80%	42,60%	47,70%

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Álvaro

La Tabla 27, muestra que en un escenario con 28 UEs, el porcentaje de paquetes perdidos no supera el 1%. Menos de 28UEs la tasa de perdidas es de 0,00% y más de 28 UEs, el porcentaje de perdidas es ascendente. Por consiguiente el número máximo de UEs que soporta la red backhaul con un máximo aceptable de 1% de paquetes perdidos es con 28 UEs.

5.6.1 Desempeño de la red backhaul LTE

El desempeño de red consiste en garantizar la disponibilidad del servicio, asegurar que la transmisión de datos llegue adecuadamente al usuario en todo momento. El reglamento de prestación del servicio de telefonía de la operadora Claro en el ítem 25 respecto a las condiciones de servicio ofrecido, indica: “La operadora prestará sus servicios en estricto apego a la regulación vigente en materia de calidad y es enteramente responsable por los servicios prestados de su propia red, garantizando una disponibilidad de al menos el 99,97%”. La resolución Nro CZO2-2018-001 ARCOTEL, de acuerdo con la definición de las normas ISO 27001 y las mejores prácticas para la administración de servicios de TI (ITIL) la disponibilidad del servicio no debería ser menos del 99,4%. Considerando el reglamento interno de la operadora y el reglamento de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones el porcentaje mínimo de desempeño que debe presentar de red será mayor al 99,4%.

Para determinar el desempeño de red se consideró la mayor carga de tráfico en cada escenario, esto ocurre cuando todos los abonados demandan simultáneamente streaming de video. Por medio de los resultados obtenidos a través de las simulaciones de tráfico se determina el comportamiento aproximado del desempeño de red backhaul LTE a través de la siguiente formula:

$$\text{Desempeño} = \frac{|Paq. Enviados - Paq. Perdidos| * 100}{Paq. Enviados}$$

Tabla 28. Desempeño de la red backhaul LTE

Escenario	Número de equipos de usuario	Paquetes promedio enviados por el PGW	Paquetes promedio perdidos por el E-NB	Desempeño de la red backhaul LTE [%]
1	31	12709	747	94,12
2	38	17739	5811	67,24
3	45	20606	8772	57,43
4	52	22802	10871	52,32

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La información del desempeño de red mostrada en la Tabla 28, es representada mediante la Figura 18, allí se evidencia que al incrementar el flujo de datos debido al aumento de equipos de usuario, el desempeño de red se va degradando, ante este panorama es necesario plantear una solución. En la Figura 18, el eje y representa el desempeño de red y el eje x representa el número de equipos de usuario.

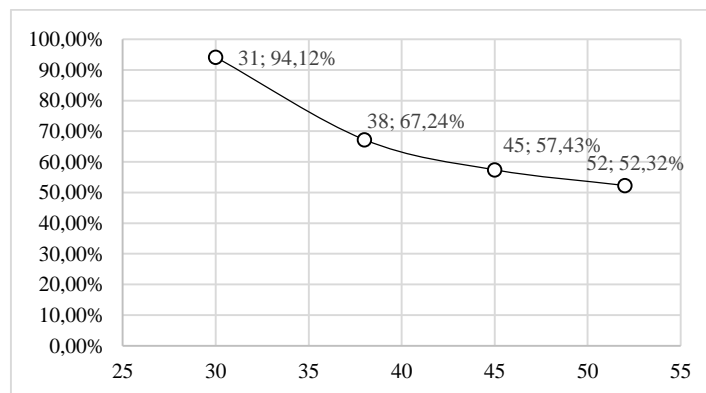


Figura 18. Desempeño del Backhaul vs equipos de usuario

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Álvaro

5.7 Planteamiento de solución

En base a los criterios de análisis se presenta una posible solución que se puede implementar ante la degradación de desempeño que muestra la red. Siendo el P-GW el elemento de red en el cual se forma el cuello de botella y el que envía la ráfaga de streaming de video a través del enlace de 10Mbps a la e-Nb, es necesario establecer un mecanismo que permita modificar la longitud de los paquetes antes de ser enviados hacia la e-Nb, reduciendo así la exigencia del ancho de banda.

Para proponer una solución, es importante saber que el protocolo que se utiliza para la transmisión del streaming de video es RTSP Real Time Streaming Protocol. Este protocolo al ser no orientado a conexión utiliza UDP *User Datagram Protocol* a nivel de transporte. Los campos del datagrama UDP se muestran en la Figura 19.

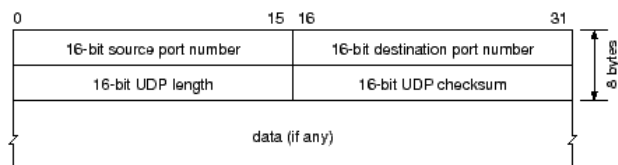


Figura 19. Datagrama UDP

Fuente: <https://tools.ietf.org/html/rfc768>

La cantidad de bytes enviados en un paquete UDP es controlable por ende el tamaño del paquete UDP también lo será. El campo para los datos de la trama tiene una longitud máxima de 1500 bytes. La cantidad de bytes en el campo *data* será máximo 1472 bytes, esto se debe a que de los 1500 bytes se resta 20 bytes de la cabecera IP y 8 bytes de la cabecera UDP.

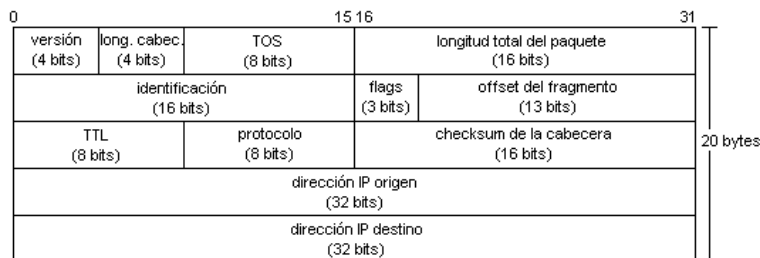


Figura 20. Cabecera IP

Fuente: <http://arantxa.ii.uam.es/~rc2lab/practicass.html/prac2/index.html>

Los campos que definen al datagrama UDP se muestran en la Figura 20 y se describe a continuación. *Source port number*, en este espacio se define el puerto de origen relacionado con la aplicación. El campo del source port tiene una longitud de 16 bits, por lo que el rango de valores va desde 0 a 65535.

Destination port number, en este espacio se define el puerto de destino que corresponde a la aplicación del equipo receptor. *Length*, en este espacio se define la longitud total del segmento con el encabezado incluido. La longitud de este campo es necesariamente mayor o igual a 8 bytes. *Checksum*, por medio de este campo se realiza la suma de comprobación de la integridad del segmento.

Con la información de los campos del datagrama UDP y por medio de la modelación se estableció que en el servidor streaming de video, este alojado un archivo multimedia de tamaño de 1 MiB (mebibytes) equivalente a 1,048576 MB cuya velocidad de entrega sea de 50 fps y que cada paquete UDP tenga una longitud de 1000 bytes. Con estos parámetros y con los 31 UEs conectados de forma simultánea en la red, como se determinó en el primer escenario, se obtuvo 5,93 % de paquetes perdidos en el enlace P-GW y e-NB.

Para reducir la tasa de paquetes perdidos en este tramo de red se varía gradualmente la longitud del paquete en el P-GW antes ser enviado a la e-NB. A través de la variación de este parámetro y a través de la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 29. Variación de la longitud del paquete en el primer escenario

Número de UEs	Longitud del paquete [bytes]	Paquetes enviados P-GW	Paquetes recibidos E-NB	Paquetes perdidos en el enlace P-GW/E-NB	Tasa de paquetes perdidos [%]	Desempeño de red backhaul [%]
31	1000	12488	11748	740	5,93	93,70
	900	12488	12001	487	3,90	95,94
	800	12488	12468	20	0,16	99,84

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 29 muestra que variando la longitud del paquete de forma gradual descendente se puede reducir la tasa de paquetes perdidos. La longitud óptima del paquete para este escenario es 800 bytes, con este valor se logra obtener 0,16 % de paquetes perdidos y se garantiza que el desempeño de la red backhaul sea mayor a 99%.

Manteniendo los mismos parámetros del servidor, pero con los 38 UEs conectados de forma simultánea en la red como se determinó en el segundo escenario, se obtuvo 32,80 % de paquetes perdidos en el enlace P-GW y e-NB. Para reducir la tasa de paquetes perdidos en este tramo de la red se varía gradualmente la tasa de envío en el P-GW. A través de la variación de este parámetro y con ayuda de la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 30. Variación de la longitud del paquete en el segundo escenario

Número de UEs	Longitud del paquete en bytes	Paquetes enviados P-GW	Paquetes recibidos E-NB	Paquetes perdidos en el enlace P-GW/E-NB	Tasa de paquetes perdidos [%]	Desempeño de red backhaul [%]
38	800	17739	14469	3270	18,43	77,40
	700	17739	16365	1374	7,75	91,60
	600	17739	17733	6	0,03	99,97

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 30 muestra que reduciendo la longitud del paquete de forma gradual se logra disminuir la tasa de paquetes perdidos. La longitud óptima del paquete para este escenario es 600 bytes, con esta longitud de paquete se logra obtener 0,03 % de paquetes perdidos y se garantiza que el desempeño de la red backhaul sea mayor a 99%.

De la misma forma para el tercer y cuarto escenario se mantienen los valores predeterminados del servidor y se varía el tamaño del paquete en el P-GW antes de ser entregado a la e-NB. Los resultados que se obtuvieron se muestran en las Tablas 31 y 32 respectivamente.

Tabla 31. Variación de la longitud del paquete en el tercer escenario

Número de UEs	Longitud del paquete en bytes	Paquetes enviados P-GW	Paquetes recibidos E-NB	Paquetes perdidos en el enlace P-GW/E-NB	Tasa de paquetes perdidos [%]	Desempeño de red backhaul [%]
45	700	20606	16367	4239	20,57	74,10
	600	20606	18835	1771	8,59	90,60
	500	20606	20600	6	0,03	99,97

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 31 muestra que reduciendo la longitud del paquete a 500 bytes, el porcentaje de paquetes perdidos se reduce a 0,03 % y se garantiza que el desempeño de la red backhaul sea mayor a 99%.

Tabla 32. Variación de la longitud del paquete en el cuarto escenario

Número de UEs	Longitud del paquete en bytes	Paquetes enviados P-GW	Paquetes recibidos E-NB	Paquetes perdidos en el enlace P-GW/E-NB	Tasa de paquetes perdidos [%]	Desempeño de red backhaul [%]
52	600	22802	18836	3966	17,39	78,94
	500	22802	22178	624	2,74	97,19
	400	22802	22780	22	0,10	99,90

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 32 muestra que al reducir la longitud de los paquetes a 400 bytes, la tasa de paquetes perdidos se reduce a 0,10 % y se garantiza que el desempeño de la red backhaul sea mayor a 99%.

Con este planteamiento de solución se ha logrado superar la dificultad mostrada en la red backhaul LTE y se permite garantizar la mayor entrega de la información a la e-NB. La Tabla 32 muestra la tasa de paquetes perdidos que se logra con la reducción de la longitud del paquete. También se puede observar que la longitud del paquete varía por escenario.

En la simulación no se estableció un mecanismo automático que permita variar la longitud del paquete cuando exista mayor flujo de datos debido a que la implementación requeriría de mayor tiempo de dedicación para la investigación. A pesar de ello se ha logrado establecer la longitud óptima del paquete en cada escenario de prueba para minimizar la tasa de paquetes perdidos, tal como se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Porcentaje de pérdida de paquetes por escenario

Escenario	Número de UEs	Longitud del paquete en bytes	Paquetes enviados P-GW	Paquetes recibidos E-NB	Paquetes perdidos en el enlace P-GW/E-NB	Tasa de paquetes perdidos [%]	Desempeño de red backhaul [%]
1	31	800	12488	12468	20	0,16	99,84
2	38	600	17739	17733	6	0,03	99,97
3	45	500	20606	20600	6	0,03	99,97
4	52	400	22802	22780	22	0,10	99,90

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

5.8 Prueba de hipótesis

Mediante la solución planteada, ante la pérdida de paquetes entre el P-GW y la e-NB, se logró reducir la tasa de paquetes perdidos en los escenarios de prueba, sin embargo es necesario demostrar matemáticamente que la proposición de la hipótesis sea consistente con los datos obtenidos, por ello se plantea la prueba de hipótesis.

5.8.1 Planteamiento de la hipótesis

La hipótesis que se plantea tiene dos formas fundamentales de ser representada, la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alterna H_a . (Walpole, Myers, & Myers, Probabilidad y estadística para ingenieros, 2000, pág. 291)

H_0 : La modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source no permite mejorar el desempeño de la red ante el incremento de usuarios móviles.

Ha: La modelación de una red backhaul LTE utilizando software Open Source permite mejorar el desempeño de la red ante el incremento de usuarios móviles.

5.8.2 Elección de la prueba estadística

La prueba estadística apropiada para la comprobación de la hipótesis, es la *t-student*, la cual permite medir la relación entre la variable dependiente e independiente. Además permite analizar si existe una diferencia estadísticamente significativa de los escenarios de prueba en dos momentos diferentes.

5.8.3 Definición del nivel de significancia

Para realizar la prueba de hipótesis es necesario definir el porcentaje o nivel de confianza dentro del cual se acepta o rechaza la hipótesis. El nivel de significancia escogido por el investigador es de $\alpha = 0,05$

5.8.4 Valoración cuantitativa de las muestras de la variable dependiente

Para que el desempeño obtenido se pueda ver como una información objetiva se establece una valoración cuantitativa sobre 10. Si el desempeño de la red backhaul LTE es de 100 % equivale a una valoración cuantitativa de 10. Las tablas 34 y 35 muestran la valoración cuantitativa del desempeño de red backhaul LTE antes y después de modificar el tamaño de los paquetes, respectivamente.

Tabla 34. Cuantificación de los resultados antes de modificar el tamaño de los paquetes

		Desempeño de red LTE antes de la modificación del tamaño del paquete	Valoración cuantitativa
Modelación de escenarios	Escenario 1	94,12%	9,41
	Escenario 2	67,24%	6,72
	Escenario 3	57,43%	5,74
	Escenario 4	52,32%	5,23

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Tabla 35. Cuantificación de los resultados después de modificar el tamaño de los paquetes

		Desempeño de red LTE después de modificar el tamaño del paquete	Valoración cuantitativa
Modelación de escenarios	Escenario 1	99,84%	9,98
	Escenario 2	99,97%	9,99
	Escenario 3	99,97%	9,99
	Escenario 4	99,90%	9,99

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

5.8.5 Análisis de la variable dependiente

Para el análisis de la variable dependiente, basta con comparar el desempeño de la red antes de modificar el tamaño del paquete con el desempeño de la red después de modificar el tamaño del paquete, tal como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36. Análisis de la variable dependiente

		Desempeño de red LTE antes de modificar el tamaño del paquete (a)	Desempeño de red LTE después de modificar el tamaño del paquete (b)	$x = (a - b)$	$(x - \bar{x})^2$
Modelación de red backhaul	Escenario 1	9,41	9,98	-0,57	6,98
	Escenario 2	6,72	9,99	-3,27	0,00
	Escenario 3	5,74	9,99	-4,25	1,08
	Escenario 4	5,23	9,99	-4,76	2,39
				$\sum x = -12,85$	$\sum (x - \bar{x})^2 = 10,46$

Elaborado por: Santiago Alvaro

Dónde:

x , es la diferencia entre el desempeño de red antes y después de modificar el tamaño del paquete.

\bar{x} , es el promedio y se expresa $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$, y n es el número de escenarios, $n = 4$.

Para realizar la prueba estadística se aplica el modelo matemático de la *t-student*, el valor de t se determina mediante la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{x}}{S_x}$$

Donde S_x , es la desviación estándar de la distribución muestral de la media y se expresa la fórmula $S_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$. Donde s es la desviación estándar de la muestra, que se expresa por medio de la siguiente relación matemática, (Bernal, 2000, pág. 195)

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Por lo tanto el valor de t , se expresa mediante los siguientes términos:

$$t = \frac{\frac{\sum x}{n}}{\frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\sqrt{n}}} \quad t = \frac{\frac{-12,85}{4}}{\frac{\sqrt{\frac{10,46}{4 - 1}}}{\sqrt{4}}} = -3,44$$

5.8.6 Grados de libertad

Los grados de libertad se determinan mediante $n - 1$, en consecuencia los grados de libertad es igual a 3.

5.8.7 Decisión

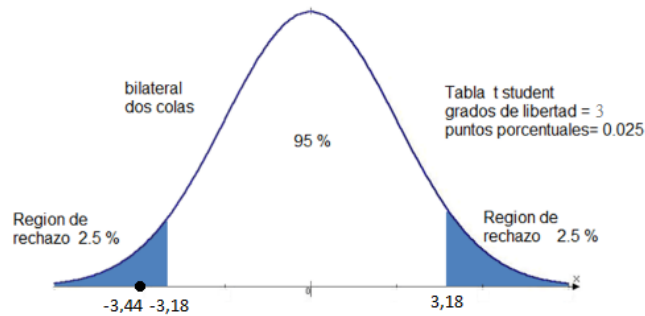
Considerando que el nivel de significancia es $\alpha = 0,05$ y 3 grados de libertad, según la Tabla 37 de valores críticos de la distribución t , el valor referencial de $t(0,025) = 3,18; -3,18$

Tabla 37. Valores críticos de la distribución t

α n-1	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,0000	1,3764	1,9626	3,0777	6,3138	12,7062	31,8205	63,6567	636,6192
2	0,8165	1,0607	1,3862	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248	31,5991
3	0,7649	0,9785	1,2498	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409	12,9240
4	0,7407	0,9410	1,1896	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041	8,6103
5	0,7267	0,9195	1,1558	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	6,8688

Fuente: (Walpole, Myers, & Myers, Probabilidad y estadística para ingenieros, 2000, pág. 683)

Siendo $t = -3,44$ el valor estimado mayor que t referencial y encontrándose en la zona de rechazo de la hipótesis nula H_0 , se acepta la hipótesis alterna H_a .



Elaborado por: Santiago Alvaro

CONCLUSIONES

OMNET++ como herramienta de modelación y simulación del tipo Open Source, permitió diseñar un modelo representativo de una porción de red backhaul LTE de orden rural, a través de un conjunto de elementos característicos de la red.

A partir del modelo de red planteado se logró crear los escenarios de prueba considerando los mismos elementos de red pero con incremento en el número de equipos de usuario, a través de ello se logró evaluar el desempeño de red, en porcentajes que va desde 94,12% al 67,24% del 67,24 al 52,43% hasta llegar al 52,32 % demostrando que el desempeño de red presenta degradación.

Mediante la modelación de red se consiguió variar de forma gradual la longitud de los paquetes de información, enviados desde el P-GW hasta el E-NB, la longitud óptima del paquete permitió establecer una tasa de paquetes perdidos menor del 1% y con ello asegurar que la disponibilidad de la red sea mayor al 99,4% tal como recomienda ARCOTEL.

La simulación de la porción de red backhaul LTE mediante la utilización del software del tipo Open Source, permitió mejorar el desempeño de red ante la inminente degradación, sin necesidad de intrusión a equipos, pruebas físicas que interrumpan operaciones, gastos de operatividad para las pruebas de carga o esperar la inconformidad del servicio por parte de los usuarios para establecer cambios.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que para la modelación y simulación de red se disponga de un computador de mayor capacidad de procesamiento o clúster para incluir variedad de tráfico, elementos del plano de control, aumentar el número de E-NB y que además permita realizar mayor número de simulaciones en menor tiempo. En caso de no disponer el hardware recomendado la simulación quedará limitado a un número máximo de simulaciones por cuestiones de hardware y tiempo.

En la medida de la disponibilidad de un computador con alta capacidad de procesamiento se recomienda considerar otros parámetros utilizados para medir el desempeño de red como el jitter, latencia, throughput los cuales permitirán obtener resultados más concluyentes.

Se recomienda que antes de realizar el remplazo del medio de transmisión el cual incluye gastos operativos y de equipamiento se busque alternativas para contrarrestar problemas de congestión en la red backhaul a través de la gestión de paquetes.

BIBLIOGRAFÍA

- (n.d.). *Terminology for IP Multicast Benchmarking*. Retrieved from <https://tools.ietf.org/html/rfc1242>
- Abdaelkader, S., & Pérez, A. (2016, Diciembre 7). *A un clic de las TIC*. Retrieved from <https://aunclidelastic.blogthinkbig.com/voz-sobre-lte-una-mejor-experiencia-empleado-digital/>
- Aguilar, I., & Heredia, R. J. (2013, Enero – Junio). Simuladores y laboratorios virtuales para Ingeniería en Computación. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*(10), 1-19. Retrieved from <http://www.ride.org.mx/1-11/index.php/RIDESECUNDARIO/article/download/578/566>
- Agustí Comes, R. (2010). *LTE*. España: Fundación Vodafone.
- Alcazar Espín, J. J. (2015, Octubre). Contribución a la Mejora del Control de Flujo en redes de Acceso inalámbrico. España.
- ARCOTEL. (2017). Servicio Móvil Avanzado. *ARCOTEL*.
- Avilés, J., & Pachacama, C. (2015, Junio). Guía para la evaluación de rendimiento de una red de datos con tecnología ethernet. *Guía para la evaluación de rendimiento de una red de datos*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Bernal, C. (2000). *Metodología de la Investigación*. Colombia: Prentice Hall.
- Bradner, G. d. (1999). *RFC 2544 - Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices*. Retrieved from Tools.ietf.org: <https://tools.ietf.org/html/rfc2544>
- Bradner, S., & McQuaid, J. (n.d.). *Network Working Group*. Retrieved from RFC 2544: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>
- C.Cox. (2012). LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications. *LTE*.
- Capella Hernández, J. V. (2014). *Introducción al simulador de redes*. Valencia.
- CEPAL. (2016). Estado de la banda ancha en América latina y el Caribe. *CEPAL*, 150.
- CIENA. (2016). Maximizar las ventajas de LTE mediante la utilización de soluciones backhaul. *CIENA*, 9.
- cisco. (2014). *analisis de core*. Retrieved 01 12, 2017, from <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- Comes, R. A., & Álvarez, F. B. (2010). *LTE Nuevas tendencias de comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone Epaña.
- Configuración de conexión SCTP*. (2017, junio 3). Retrieved from <https://medium.com/long-term-evolution/sctp-connection-setup-reconfiguration-and-release-7adf0be9e9f7>

- Doerr, B., & Grumbine, A. (2017). Deje de malgastar tiempo y dinero peleándose con el análisis de datos mientras diseña experimentos de medida y prueba. *Revista Española de Electrónica*(757), 76-78. Retrieved from <https://www.redeweb.com/datos/media/2017/10/Diciembre757.pdf>
- Elección simulador de red.* (2012). Retrieved from http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/artes-old/csic_mac_2012/Elecci%C3%B3nNS3.pdf
- Ericsson, J. (n.d.). Mobile broadband backhaul. *Planning backhaul networks*.
- Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw Hill.
- García, A., Lina, M., & Navarro, A. (2011). Método de evaluación y selección de herramientas de simulación de redes. *Sistemas y Telemática*, 213.
- General packet radio service tunneling protocol (GTP) packet filter.* (n.d.). Retrieved from Patents.google.com: <https://patents.google.com/patent/US20030081607A1/en>
- Gomez, J. (2017, Enero 9). *El consumo de contenidos en streaming se incrementa en 2016*. Retrieved from <https://www.comunicae.es/nota/el-consumo-de-contenidos-en-streaming-se-1172913/>
- Hernández, E. M. (2014). *Redes de transporte heterogéneas para Femtoceldas 3G rurales en países en desarrollo*. Trabajo Fin de Máster, Universidad Rey Juan Carlos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Retrieved from http://www.ehas.org/wp-content/uploads/2015/10/TFM_Esteban_Municio-LQ.pdf
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2010). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.
- INET Framework for OMNET++.* (2016, Enero 22). Retrieved from <https://omnetpp.org/doc/inet/api-current/inet-manual-draft.pdf>
- Jaramillo, S., Cardona, S. A., & Fernández, A. (2015, diciembre). Minería de datos sobre streams de redes sociales, una herramienta al servicio de la Bibliotecología. *Información, cultura y sociedad*(33), 63-74. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5988851.pdf>
- Lavallée, B. (2016). Mobile backhaul. *Ciena Essentials*, 36.
- Lista de modos straming y velocidades de fotograma.* (2015). Retrieved from Pro-av.panasonic.net: [https://pro-av.panasonic.net/manual/html/AJ-PX380G\(VQT5L72A-2\(S\)\)/chapter04_12_04.htm](https://pro-av.panasonic.net/manual/html/AJ-PX380G(VQT5L72A-2(S))/chapter04_12_04.htm)
- LTE Backhaul. (2014). *Iquall Network*, 12.
- Luo, L., & Zhang, C. (2016). *Signal Processing for 5G*. India: John Wiley & Sons. Ltda.
- Malik, A., Cortes, A., & Ayadi, A. (2015). *INET Framework*. Retrieved from <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>
- Martínez, E. (n.d.). *Eveliux.com*. Retrieved from <http://www.eveliux.com/mx/La-evolucion-de-la-telefoniamovil.html>
- Martínez, G. (2012, Septiembre 16). *Tipos de metodos de Investigación*. Retrieved from <http://tiposdemetodosdeinstigacion.blogspot.com>.
- Metodología de investigación* . (2013, Agosto 12). Retrieved from Diseños cuasi-experimentales: <http://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com>

- Metsala, E., & Salmelin, J. (2016). *LTE BACKHAUL*. FINLANDIA: Wiley & Sons, Ltd.
- Montilla Bravo, A. (2009, Julio). Arquitectura de red de acceso móvil. España.
- Morales, M., Calle, M., & Tovar, J. (2103). *Simulando con OMNET*. Cali: Claros editores SAS.
- Morales, M., Calle, M., Tovar, J., & Cuéllar, J. (2013). *Simulando con OMNET*. Cali: Claros Editores SAS.
- Morán, G., & Alvarado, D. (2010). Métodos de investigación. México: Pearson.
- Moreno Tubón, C. (2017). Estudio de la Tecnología LTE en la banda de 700 MHz. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Nardini, G., & Virdis, A. (2015). *SimuLTE - LTE User Plane Simulator for OMNeT++ and INET*. Retrieved from Simulte.com: <http://simulte.com/index.html>
- Networksorcery.com*. (2012). Retrieved from <http://www.networksorcery.com/enp/protocol/udp.htm>
- Nwawelu, U. N., Ani, C. I., & Ahaneku, M. A. (2017, January). Comparative Analysis Of The Performance Of Resource Allocation Algorithms In Long Term Evolution Networks. *Nigerian Journal of Technology*, 36(1), 163 – 171. doi:10.4314/njt.v36i1.21
- Obaidat, M., Kacprzyk, J., & Filipe, J. (2015). *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. Vienna: Springer.
- Ortiz Torres, A. M. (2011, Julio). Técnicas de enrutamiento inteligente para redes de sensores inalámbricas. *Tesis Doctoral*. Albacete, España.
- Pérez, M., Valdiviezo, L., & Luque, E. (2013). Simulador de Clusters para aplicaciones de computo. *Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 151.
- R. Romero. (2013). Redes inalámbricas y simulación de WLAN mediante OPNET. España.
- Rodríguez, N. R., Murazzo, M. A., & Gagliardi, E. O. (2015). Estrategias de control topológico para reducir la interferencia en Redes Inalámbricas Multisalto. *XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 1-9. Retrieved from http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/50510/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1
- Rusan, A., & Vasiu, R. (2017). IP Impairment Testing for Wireless Mobile Networks. *DE GRUYTER OPEN*, 1-8. doi:10.1515/cplbu-2017-0037
- Sandu, F., & Cserey, S. (n.d.). *Simulation of LTE Signaling*. Romania.
- Santos Díaz, N. (2013). *Modelo de Simulación para redes*. Barcelona.
- Scholz, B., Morales, J., & Mena, J. (2015, Diciembre). *Ministerio Desarrollo Urbano y Vivienda*. Retrieved from Habitat III: https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/05/Informe-Pais-Ecuador-Enero-2016_vf.pdf
- Sierra, J., & Iparraquirre, T. (2018). *DataKey*. Retrieved from <http://www.datakey.galeon.com/muestra.html>
- SoftDoit. (n.d.). *SoftDoit*. Retrieved from <https://www.softwaredoit.es/index.html>: <https://www.softwaredoit.es/definicion/definicion-software-de-soporte.html>

- Subramanian, R. (2015, July). Simulated Performance Metrics of LTE systems for large number of users. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(7), 419-423. Retrieved from http://ijiset.com/vol2/v2s7/IJISSET_V2_I6_55.pdf
- Vargas, A. (2016). *OMNET++ Simulation Manual*.
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2000). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Pearson.
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística*. México: Pearson.

