

INFORMÁTICA Y SISTEMAS

REVISTA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMÁTICA
Y LAS TELECOMUNICACIONES



Vol. 3, No. 1, (Enero 2019), 1-22

ISSN 2550-6730

Recibido: 12/01/2019

Aceptado: 27/01/2019

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 ¹ Carlos Gualberto Badillo Salazar ² Gladys Lorena Aguirre Sailema ³ Marco Vinicio Ramos Valencia ⁴

¹Instituto de Postgrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Riobamba, Ecuador

²TVCABLE, Quito, Ecuador,

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador,

⁴Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador,

santyalvaro@hotmail.org, cbadillo@ieee.com, gaguirre@epoch.edu.ec,
marco.ramos@epoch.edu.ec

RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad de prever los cambios necesarios que requiere una porción de red backhaul LTE a medida que evolucionan la demanda del consumo de datos y se incrementan los usuarios conectados a la red. Con el incremento del flujo de datos en la red, en particular el tráfico streaming de video, los operadores de redes móviles requieren pruebas de carga y un análisis prospectivo para evaluar el desempeño de red.

Para mejorar el desempeño de red ante el incremento de usuarios móviles se plantea modelar una porción de red backhaul LTE de una zona rural, en OMNET++. El modelo de red se fundamenta en características técnicas de arquitectura funcional que a través de un servidor externo a la red backhaul LTE transfiera paquetes streaming de video con longitud de 1000 bytes a 31 equipos de usuario.

A partir del primer escenario se plantea tres escenarios de prueba con los mismos elementos de red de la estructura principal pero con diferente número de usuarios. Cada escenario de prueba es sometido a un número determinado de simulaciones. Los resultados de las simulaciones permitieron validar el comportamiento aproximado del desempeño de red y permitió presentar una solución ante la degradación.

ABSTRACT

The present work arises from the need to foresee the necessary changes that a portion of LTE backhaul network requires as the demand for data consumption evolves and the users connected to the network increase. With the increase in the flow of data on the network, particularly video streaming traffic, mobile network operators require load testing and a prospective analysis to evaluate network performance.

To improve the performance of the network in the face of the increase in mobile users, we propose to model a portion of the LTE backhaul network of a rural area, in OMNET++. The network model is based on technical characteristics of functional architecture that, through a server external to the LTE backhaul network, transfers streaming video packets with a length of 1000 bytes to 31 user equipment. From the first scenario, three test scenarios are proposed with the same network elements of the main structure but with a different number of users. Each test scenario is subjected to a certain number of simulations. The results of the simulations allowed to validate the approximate behavior of the network performance and allowed to present a solution to the degradation.

KEYWORDS: BACKHAUL LTE, PERFORMANCE, OPEN SOURCE, STREAMING VIDEO.



1. Introducción

La red backhaul forma parte de la tecnología actual de comunicación móvil LTE a nivel mundial. Esta tecnología es de gran avance para la industria de las comunicaciones móviles, tiene mayor capacidad, cobertura y velocidad de transmisión de datos, en relación a las tecnologías predecesoras.

Los avances de las comunicaciones móviles a nivel mundial se sustentan sobre la tecnología de red backhaul LTE cuyo sistema es invisible para el usuario, pero cuyas innovaciones y estudio han sido de vital importancia para llegar a los sistemas actuales de comunicación móvil. A medida que evolucionan los sistemas de comunicación móvil aumenta el número de usuario y la demanda del servicio. Estudios con estimaciones conservadoras predicen que existirá mayor cantidad de datos circulando en la red móvil por nuevos dispositivos conectados.

El tipo de dispositivo más común para acceder a la red móvil es el Smartphone, este dispositivo genera un tráfico de 929 MB por mes, para el 2020 se estima que el tráfico será de 4406 MB por mes [1]. Nueve de cada diez personas conectadas a internet en América latina utilizan el Smartphone, según la publicación realizada por comScore Inc e IMS Internet Media Services, sobre el consumo móvil en la región. 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. Se espera que para los próximos años este porcentaje sea mayor, según el reporte de Cisco Visual Networking Index 2017.

El objetivo general de la investigación es modelar una red Backhaul LTE utilizando software Open Source para mejorar el desempeño de la red, ante el incremento de usuarios móviles. Para cumplir con el propósito de la investigación también se estableció objetivos específicos. Diseñar un modelo de red backhaul LTE considerando los elementos de infraestructura característicos. Implementar cuatro escenarios de simulación a partir del modelo de red backhaul LTE, para realizar carga de tráfico streaming de video aumentando equipos de usuario. Evaluar el desempeño de la red backhaul LTE fundamentado en los resultados obtenidos en el proceso de simulación de los escenarios, para detectar posibles degradaciones en el desempeño de red.

2. Marco Referencial

2.1. 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 ofrece 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 [2].

2.2. Arquitectura de red backhaul 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. Los elementos de red se aprecian en la Figura 1.

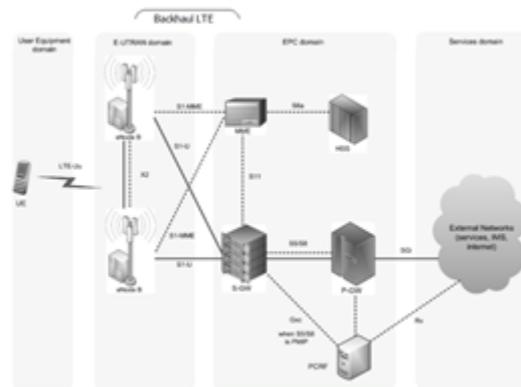


Figura 1: Arquitectura de Red backhaul en LTE
Fuente: [3]

2.3. 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 [4]. 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 [5].

2.4. Elementos de red backhaul LTE

Los dispositivos que forman parte de la red Backhaul LTE son: eNB, MME, S-GW, P-GW. 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 son los UE (User Equipment) equipos de usuario. El eNB utiliza los protocolos E-UTRAN OFDMA para enlaces de bajada y SC-FDMA para enlaces de subida y 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.

2.5. 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 [6].

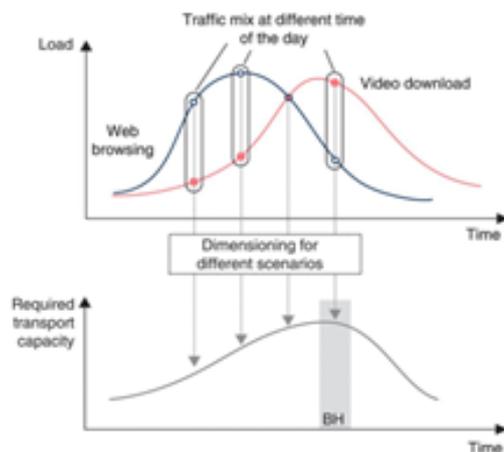


Figura 2: Demanda de tráfico de datos en un día - Carga de hora ocupada

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

La Figura 2 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 3 [6].



Figura 3: 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, 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).

3. Metodología de Investigación

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utiliza para el desarrollo del trabajo de titulación, es cuasi experimental, que se deriva del tipo 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 [7]. 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

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.



3.3. Métodos de investigación

Los métodos utilizados en la investigación son: Método científico, este método tiene la característica 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 [8], 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 [9], por las características que presenta este método de investigación, es aplicable al capítulo de la 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 [8], por este motivo este método se aplica en el 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. 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 [8], 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 [10]. Este enfoque se adapta a los requerimientos 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 [10], 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 [10] por lo tanto este alcance es aplicado a la investigación cuyo propósito es conocer la relación que existe entre el número de equipos que demandan tráfico streaming de video y la tasa de pérdidas de paquetes en los distintos escenarios de prueba a través del cual permitan conocer el desempeño de red backhaul LTE.

La investigación también tiene alcance explicativo, este alcance pretende establecer las causas de los eventos y las condiciones en que se manifiesta el objeto de estudio [10], por ello este alcance es aplicado a la investigación debido a que mediante la interpretación de resultados se procura responder las posibles



causales de los efectos que provoca el aumento del tráfico de datos en el desempeño de la red backhaul LTE.

4. Modelación de una Porción de Red Backhaul

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 [13]. Para crear el modelo de red backhaul LTE, se instaló en el computador de manera secuencial las herramientas software OMNET++ de la página web oficial <https://www.omnetpp.org/>, INET [11] Framework de la página oficial <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html> y SimuLTE de <http://simulte.com/index.html>. Con el software disponible en el computador se trabaja sobre OMNET++ en el modelo de red que representa una porción de la backhaul LTE de estructura funcional.

Para el modelamiento se considera como referencia una ubicación real del eNB. El eNB está situado en la parroquia de Llano grande, sector rural del nororiente de la ciudad de Quito. Ubicación Geográfica 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, Cell ID 131350049.

El modelamiento de red es aplicado a esta zona debido a que representa a una zona rural con amplio territorio pero bajamente urbanizado. 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). El escenario que se ajusta para el modelamiento de red se muestra en la Figura 4.

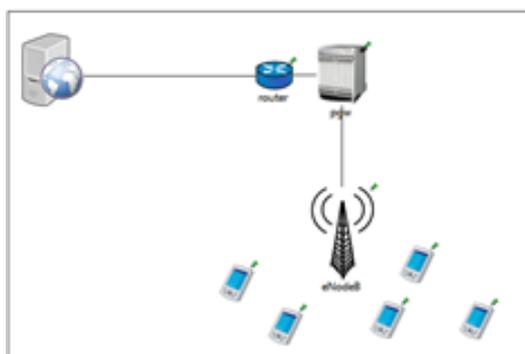


Figura 4: Porción de red backhaul LTE
Elaborado por: Santiago Alvaro

La naturaleza de red backhaul LTE soporta variedad de tráfico de datos, sea video, audio, Voz sobre LTE, video y audio simultaneo, entre otros [12]. Sin embargo en el modelo a simular se define que la infraestructura backhaul LTE solo soporta video y audio simultaneo conocido como streaming de video. Además se considera que la infraestructura 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 1 del documento TR36.932 del propio 3GPP.



Tabla 1: 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: [13]

La Tabla 1 muestra la categorización del backhaul no ideal, este tipo de backhaul es típico y ampliamente utilizado en el mercado como DSL Access, cable, microondas, en áreas rurales.

4.1. Elementos del modelo de red

Los elementos de red que se han considerado para la construcción de los escenarios de modelación de la red backhaul LTE son los módulos y sub-módulos que se encuentran en la librería de SimuLTE de OMNET++ y se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Módulos y sub-módulos de red

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

Elaborado por: Santiago Alvaro

4.2. Medios Físicos

Cada nodo en la red está identificado por un módulo, para las conexiones entre módulos se utiliza medios físicos. El medio físico más común es 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 3.



Tabla 3: Categoría no ideal de backhaul

Equipo origen	Capacidad Medio físico	Equipo destino
Servidor streamig	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.

4.3. Definición de la e-NB y UE

La información que contienen las Tablas 4 y 5 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 4: Parámetros del equipo de usuario

Movilidad	Aleatoria
Ubicación	Aire libre
Potencia de transmission	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 5.

Tabla 5: 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. Configuración del entorno gráfico

Para establecer el entorno gráfico del escenario de prueba, se desarrolla las líneas de programación en lenguaje NED. El archivo que contiene la programación del entorno de simulación en el archivo Single-Cell.numUE.NED.



```
// Líneas del programa principal
package lte.simulations.networks;
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;bgi=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;
}
```

Figura 5: Líneas de programación que definen el escenario principal
Elaborado por: Santiago Alvaro

Las líneas de programación, mostradas en la Figura 5, 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 entorno gráfico que tendrá el escenario de simulación, como se muestra en la Figura 6. Y lo más importante se define las librerías para que los sub-módulos funcionen con normalidad.

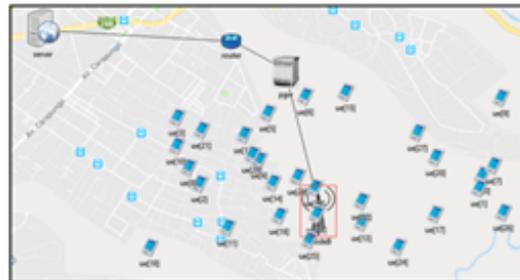


Figura 6: Entorno gráfico del escenario de prueba de la red backhaul LTE
Elaborado por: Santiago Alvaro

A partir de este escenario se derivan los demás escenarios de prueba, mostrados en la Figura 7, que consisten en mantener la infraestructura de red y variar el número de equipos de usuario conectados de forma simultánea.

En el primer escenario de pruebas, la demanda de tráfico streaming satisface a 31 UEs que se conectan a la red, 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. Los escenarios de prueba se muestran en la Figura 7.

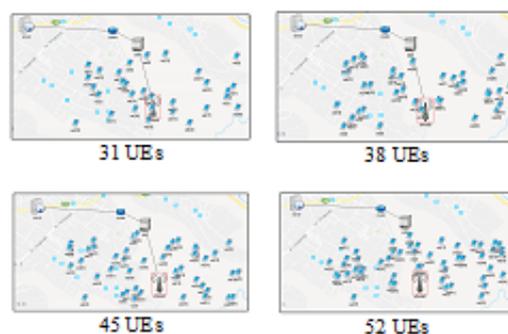


Figura 7: Escenarios de prueba de la red backhaul LTE
Elaborado por: Santiago Alvaro

El proceso de conexión entre el usuario y servidor se inicia con la comunicación entre el UE User Equipment y el eNB involucra 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 según cada escenario, estos fotogramas llegan a cada nodo de la red y allí se realiza el recuento de los fotogramas.

Los escenarios de prueba tienen un incremento de equipos de usuario a partir del escenario principal de modelación que va desde 31, 38, 45, hasta 52 UEs que se conectan a la red. Este incremento corresponde al índice de penetración de LTE en América Latina sobre la utilización de los Smartphone en la red LTE. Cada escenario de pruebas es sometido a tráfico streaming de video que demandan los usuarios. El número de simulaciones definido por cada escenario es de 36.

En los escenarios de modelación, los recursos de radio disponible se dividen entre suscriptores activos. Por



lo tanto cuanto más abonados estén activos, menos recursos se asignarán a un suscriptor determinado. 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 máximo durante la denominada hora ocupada, cuando la carga demandada es mucho mayor que el resto del día, considerando esta información, el tiempo considerado por cada simulación es de 10 segundos, cuando todos los UE se conecten simultáneamente a la red. Una vez establecidas las condiciones de red y definidos los elementos que intervienen en la infraestructura se procede a ejecutar las simulaciones para obtener resultados que se acerquen a un comportamiento de lo más real posible.

5. Análisis de Resultados

El documento RFC 2544 de la IETF define una serie de pruebas que se puede utilizar para describir el desempeño de una red, entre ellas están el Frame Loss Rate, Porcentaje de Tramas Perdidas [14]. Frame Loss Rate, 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.

5.1. Análisis de paquetes perdidos en la transmisión

A continuación en la Tabla 6, 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 6: 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 7, la cual muestra el número de paquetes perdidos en cada enlace y elemento de red.



Tabla 7: 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	12	11	10871

Fuente: Información recuperada de las simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

Según la Tabla 7, 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 pierden 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 pierden 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 8 se muestra la interpretación gráfica de los paquetes enviados por el PGW y recibidos por el E-NB.

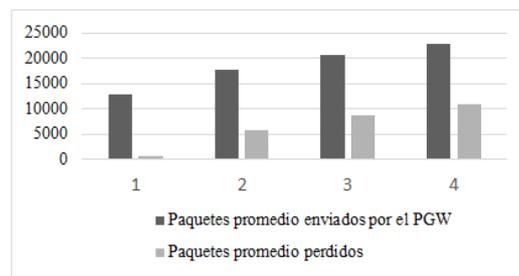


Figura 8: Paquetes enviados PGW y paquetes recibidos E-NB

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

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 fórmula:

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



Paq.Env, es el número de paquetes enviados Paq.Rec, es el número de paquetes recibidos FLR, es Frame Loss Rate. [15]

Tabla 8: Tasa de paquetes perdidos en el backhaul LTE

Escenario	Número de equipos de usuario	Paquetes promedio enviados PGW	Paquetes promedio recibidos E-NB	Tasa de paquetes perdidos en el backhaul LTE [%]
1	31	12709	11962	5,88
2	38	17739	11928	32,76
3	45	20627	11834	42,57
4	52	22832	11931	47,68

Fuente: Información recuperada de las simulaciones
Elaborado por: Santiago Alvaro

La representación gráfica de la tasa de paquetes perdidos (eje y) en función del número de equipos (eje x) conectados en la red, se muestra en la Figura 9.

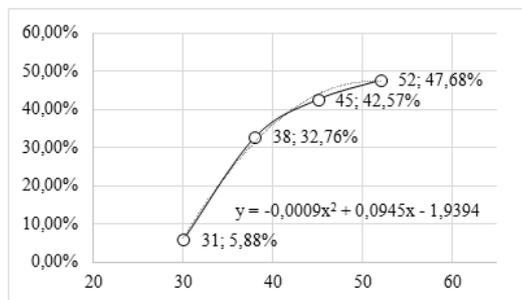


Figura 9: Tasa de paquetes perdidos en la transmisión de la red backhaul (eje y) vs UEs (eje x)

Fuente: Simulaciones
Elaborado por: Santiago Alvaro

Al aplicar la herramienta de estimación de tendencia polinómica de MS-Excel, se puede realizar una estimación aproximada de las pérdidas que representa la incorporación de equipos (UEs) en la red. Considerando que en el escenario 2 se incorporaron 7 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 estima que en escenarios con menor número de UEs, el porcentaje de paquetes perdidos disminuye, tal como se describe en la Tabla 9.



Tabla 9: Estimación de la tasa de paquetes perdidos en escenarios con menor número de UEs.

	Escenario			Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 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 Alvaro

La Tabla 9, muestra que en un escenario con 28 UEs, el porcentaje de paquetes perdidos no supera el 1%. Menos de 28 UEs 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.

5.2. Análisis de desempeño de la red backhaul LTE

El desempeño de red consiste en garantizar la disponibilidad del servicio, asegurar que la transmisión de datos llegue 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 [16], 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:

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



Tabla 10: Desempeño de la red backhaul LTE

Escenario	Número de equipos de usuario	Paquetes promedio enviados PGW	Paquetes promedio recibidos E-NB	Desempeño de la red backhaul LTE [%]
1	31	12709	747	94,12
2	38	17739	5811	67,24
3	45	20627	8772	57,43
4	52	22832	10871	52,32

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La información del desempeño de red mostrada en la Tabla 10, es representada mediante la Figura 10, 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.

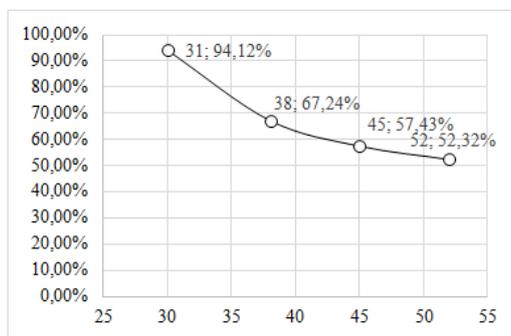


Figura 10: Rendimiento del Backhaul (eje y) vs equipos de usuario (eje x)

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

5.3. 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 11.

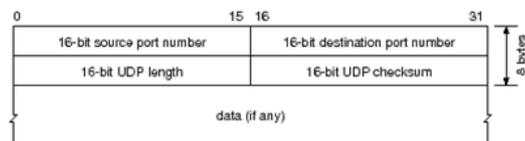


Figura 11: Rendimiento del Backhaul (eje y) vs equipos de usuario (eje x)

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.

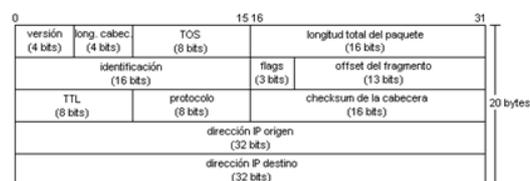


Figura 12: Cabecera IP

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

Los campos que definen al datagrama UDP se muestran en la Figura 12 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 11: 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
31	900	12488	12001	487	3,90	95,94
31	800	12488	12468	20	0,16	99,84

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 11 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 12: Variación de la longitud del paquete en el segundo 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 [%]
38	800	17739	14469	3270	18,43	77,40
38	700	17739	16365	1374	7,75	91,60
38	600	17739	17733	6	0,03	99,97

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 12 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 mantuvieron los valores predeterminados del servidor y se fue variando 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 13 y 14 respectivamente.



Tabla 13: Variación de la longitud del paquete en el segundo 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 [%]
45	700	20606	16367	4239	20,57	74,10
45	600	20606	18835	1771	8,59	90,60
45	500	20606	20600	6	0,03	99,97

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 13 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 14: Variación de la longitud del paquete en el segundo 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 [%]
52	600	22802	18836	3966	17,39	78,94
52	500	22802	22178	624	2,74	97,19
52	400	22802	22780	22	0,1	99,9

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

La Tabla 14 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 15 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 15.



Tabla 15: Desempeño de red backhaul LTE

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

Fuente: Simulaciones

Elaborado por: Santiago Alvaro

6. 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.

7. Recomendaciones

Se recomienda que para la modelación y simulación de red se disponga de un 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 quedara 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.



8. Agradecimientos

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. Y sobre todo a mi Dios por regalarme la vida y ser fuente de inspiración. A mi Tutor de tesis, Carlos Gualberto Badillo un agradecimiento especial por compartir su conocimiento y tiempo, sugerencias y aportaciones críticas para el desarrollo de la tesis.

A los miembros del tribunal, Marco Vinicio Ramos y Gladys Lorena Aguirre por su conocimiento y disponibilidad para la revisión y corrección de este trabajo de investigación.

Referencias

- [1] Cepal.org. *Estado de la banda ancha en América Latina y el Caribe 2016 | Publicación | Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. 2016. URL: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40528-estado-la-banda-ancha-america-latina-caribe-2016> (visitado 10-10-2018).
- [2] Christopher (Christopher Ian) Cox. *An introduction to LTE : LTE, LTE-advanced, SAE, and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012. ISBN: 1119943531. URL: https://books.google.com.ec/books/about/An%7B%5C_%7DIntroduction%7B%5C_%7Dto%7B%5C_%7DLTE.html?id=G5C5ii80%7B%5C_%7Dy0C%7B%5C%7Dredir%7B%5C_%7Ddesc=y.
- [3] Florin Sandu, Szilard Cserey y Eugen Mile-ciobanu. *Simulation of LTE Signaling*. Inf. téc. 2010. URL: <http://www.dasconference.ro/cd2010/data/papers/B118.pdf>.
- [4] Ramón Agusti y col. *LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES AUTORES*. Inf. téc. 2010. URL: http://www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro%7B%5C_%7Dlte.pdf.
- [5] Gaspar Pedreño López. *Contribución a la Mejora del Control de Flujo en Redes de Acceso Inalámbrico*. Inf. téc. 2015. URL: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5320/cmc.pdf?sequence=1>.
- [6] Esa. Metsälä y Juha. Salmelin. *LTE backhaul : planning and optimization*. 2016. ISBN: 9781118924648. URL: <https://www.wiley.com/en-us/LTE+Backhaul+%7B%5C%7D3A+Planning+and+Optimization-p-9781118924648>.
- [7] Eliseo Moreno Galindo. *Metodología de investigación, pautas para hacer Tesis*. URL: <http://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com/> (visitado 03-03-2018).
- [8] Gabriela Morán Delgado y Darío Gerardo Alvarado Cervantes. *Métodos de investigación*. Primera. Pearson Educación, 2010. ISBN: 978-607-442-219-1.
- [9] G. Martínez. *Tipos de métodos de investigación*. URL: <http://investigaciondemetodos.blogspot.com/2015/04/> (visitado 03-03-2018).
- [10] R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista. *Metodología de la Investigación*. McGRAW-Hill, 2010. ISBN: 9786071502919.
- [11] INET Framework. *INET Framework for OMNET++*. 2016. URL: <https://doc.omnetpp.org/inet/api-3.4.0/inet-manual-draft.pdf> (visitado 03-03-2018).
- [12] José Javier Gil García. *A un clic de las TIC*. URL: <https://aunclidelastic.blogthinkbig.com/voz-sobre-lte-una-mejor-experiencia-empleado-digita/> (visitado 03-03-2018).
- [13] L. Luo y C Zhang. *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*. ISBN: 978-1-119-11646-2. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Signal+Processing+for+5G%7B%5C%7D3A+Algorithms+and+Implementations-p-9781119116462>.



- [14] S. Bradner y J. McQuaid. *Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices*. Inf. téc. Mar. de 1999. DOI: 10.17487/rfc2544. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc2544>.
- [15] Cristian Jesus Pachacama Llumiquinga y Javier Alejandro Avilés Yunda. “Guía para la Evaluación del Rendimiento de una Red de Datos con Tecnología Ethernet”. En: (jun. de 2015). URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11046>.
- [16] Arcotel.gob.ec. *Servicio Móvil Avanzado – Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones*. 2017. URL: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado/> (visitado 20-08-2019).