UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN
DE UNA RED DE TRANSPORTE HETEROGÉNEA
PARA TECNOLOGÍA MÓVIL 3G EN LA AMAZONÍA PERUANA

AUTOR: Dª. AMALIA VILLA GÓMEZ

TUTOR: D. MANUEL LAMBEA OLGADO

TRIBUNAL:

PRESIDENTE: D. MANUEL LAMBEA OLGADO

VOCAL: D. MANUEL SIERRA CASTAÑER

SECRETARIO: Dª. MARÍA JESÚS LEDESMA CARBAYO

SUPLENTE: D. SANTIAGO IGLESIAS PRADAS

Fecha de lectura:

Calificación:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE HETEROGÉNEA PARA TELEFONÍA MÓVIL 3G EN LA AMAZONÍA PERUANA

AMALIA VILLA GÓMEZ

2015

Resumen

Este trabajo responde a la necesidad de llevar las tecnologías de la información a zonas rurales aisladas. Es en estas zonas donde se localiza la mayor pobreza, aún más en los países en desarrollo; y en las que el acceso a las TIC tiene un papel más importante para ayudar a disminuir estas desigualdades.

TUCAN-3G, proyecto en el que se enmarca este trabajo, plantea una solución para introducir la telefonía móvil y servicios de datos en este tipo de zonas. Propone alternativas técnicas a los enlaces satelitales empleados habitualmente para estas áreas y un modelo de negocio basado en las posibilidades económicas de los usuarios de zonas rurales, solventando los principales obstáculos encontrados en la actualidad para la instalación de redes en estas áreas.

Este trabajo apoya el despliegue de un piloto en la Amazonía Peruana a partir de la investigación realizada en etapas previas del proyecto. Más concretamente, se detalla el trabajo asociado a la maqueta de la red de transporte ubicada en el Río Napo, que conecta la red de acceso con la red del operador. Esta red heterogénea está formada por enlaces establecidos mediante distintas tecnologías inalámbricas de larga distancia, por las que se envía y gestiona tráfico de voz, datos y señalización.

En este documento se detallan las características de las tecnologías empleadas en la red de transporte, la configuración e instalación de los equipos que formarán la red de transporte del piloto en la selva y las pruebas realizadas para verificar el correcto funcionamiento de la maqueta en términos de capacidad, diferenciación de tráfico y seguridad.

Abstract

This project meets the need of enabling the access to Information and Communication Technologies in rural isolated areas. These areas gather the poorest population, even more in developping countries. Therefore, the access to TICs has an important role in order to help to reduce inequalities.

TUCAN-3G, project within this TFG is inscribed, proposes a solution in order to progressively introduce mobile telephony and data services in these kind of areas. In order to do this, TUCAN-3G offers technical alternatives to satellite links (which have been the only option considered recently) and a business model based on the economic possibilities of the users in rural areas. Through these specifications, the main obstacles associated to the installation of networks in these kind of areas are solved.

This TFG supports the display of a demostration platform in the Peruvian Amazonia based on the research made in previous phases of the project. More specifically, the processes related to the backhaul network located in the Napo River is explained, which connects the access network to the core network. This heterogeneus network consists on links established through different wireless technologies for long distances that will support and manage voice, data and signalization.

In this document, the characteristics of the technologies used in the backhaul network, the configuration and deployment of the systems that will be part of the network installed in the jungle and the testing of them are detailed. In order to test the network, capacity, traffic differentiation and security will be taken into consideration.

Palabras clave

Zonas rurales aisladas, telefonía, desarrollo, TUCAN3G, EHAS, GTR, 3G, WiFi, WiLD, WiMAX, VSAT, femtoceldas, Iperf, QoS, IPSec, ipsec-tools, racoon, D-ITG, tráfico, throughput, jitter, retardo, pérdida de paquetes, capacidad, simulación, llamadas, datos, señalización.

Keywords

Aisolated rural areas, telephone, development, TUCAN3G, EHAS, GTR, 3G, WiFi, WiLD, WiMAX, VSAT, femtocells, Iperf, QoS, IPSec, ipsec-tools, racoon, D-ITG, traffic, throughput, jitter, delay, packet loss, simulations, callings, data, signalization.

"[...]–¿Y díganos, Selma, qué haría si tuviese más tiempo?

–Al amanecer comería algo de hierba, al mediodía conversaría con los niños y después haría un poco de deporte. Después me gustaría charlar un poco con la señora González. Sin olvidar un buen sueño profundo.

–¿Y si le tocase la lotería?

–Al amanecer comería mucha hierba, al mediodía conversaría un buen rato con los niños y después haría un poco de deporte. Después me gustaría charlar con la señora González, caería en un sueño profundo y dormiría a pierna suelta."

Jutta Bahuer. "Selma".

"[...] Pero aquí abajo abajo
cada uno en su escondite
hay hombres y mujeres
que saben a qué asirse
aprovechando el sol
y también los eclipses.
Apartando lo inútil
y usando lo que sirve
con su fe veterana
el Sur también existe. [...]

Mario Benedetti

Agradecimientos

A mi familia, por apoyarme en lo que no compartían y hacerlo suyo también. Os quiero mucho.

A Víctor García, por involucrarme en el TUCAN y a Ignacio Prieto por su ayuda y comentarios. A Manuel Lambea por decir que sí y a la UPM por concederme la beca.

A Juan Paco y Joel Aragón por ayudarme en estos meses. A todos los compañeros del GTR que han compartido este tiempo y esta experiencia.

A los amigos de este lado y del otro del Atlántico, que han compartido conmigo estos lindos meses y estos geniales años de carrera.

A Jorge por muchos punto y seguido. A Paula por ser sencillamente tú.

A Esteban, casi por todo.

CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN **1**
1.1 Contexto 1
1.2 Proyecto TUCAN3G 2
1.3 Red piloto en el Río Napo 3
1.4 Objetivos 5
1.5 Metodología 5

2 MARCO TEÓRICO **7**
2.1 Introducción 7
2.2 Estado del arte de las tecnologías inalámbricas de larga distancia 7
2.2.1 Estándar IEEE 802.11 7
2.2.1.1 WiFi en larga distancia (WiLD) 10
2.2.2 Estándar IEEE 802.16 10
2.2.2.1 WiMAX en larga distancia 11
2.2.3 Comunicaciones por satélite 11
2.2.3.1 VSAT en zonas rurales 12
2.3 Femtoceldas para redes de acceso en zonas rurales 13
2.4 Conclusiones para la red de Napo 15

3 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE TRANSPORTE **16**
3.1 Contexto técnico específico de la red del Napo 16
3.2 Requerimientos de la red de transporte 17
3.3 Equipos 18
3.4 Estimación de tráfico 20

4 IMPLEMENTACIÓN **21**
4.1 Instalación en el laboratorio del GTR 21
4.1.1 Diagrama de red y direccionamiento 21
4.1.2 Configuración de los enlaces inalámbricos 22
4.1.3 Configuración NAT 22
4.1.4 Configuración NTP 23
4.1.5 Configuración IPSec 23
4.1.6 QoS 24
4.1.7 Scripts de tráfico 25

4.2 Instalación en el laboratorio de Telefonica 26

5 PRUEBAS Y RESULTADOS 27

5.1 Pruebas en el laboratorio de GTR 27

5.1.1 Capacidad de los enlaces 27

5.1.2 QoS 28

5.2 Pruebas en el laboratorio de Telefonica 30

6 CONCLUSIONES 33

Bibliografía 35

Lista de Figuras

1.1 Viviendas con acceso a las TIC en función de su pobreza y área residencial(Tucan 3G, D41) 2
1.2 Río Napo, Departamento de Loreto, Perú 4

2.1 Comparación throughput en función de la distancia para distintas tecnologías. (D52) 15

3.1 Poblaciones conectadas por la red del Napo 17
3.2 ESquema de la red del Napo 18

4.1 Diagrama de red 21
4.2 Ejemplo de configuración del NAT en el router de borde . . . 22
4.3 Paquete IP (arriba). Paquete encapsulado en modo tunel ESP (abajo) 23
4.4 Captura de tráfico encapsulado 24

5.1 Throughput de subida afectado por QoS e IPSec 28
5.2 Comparación del throughput subida limitado por la QoS, sin y con IPSec 29
5.3 Throughput de bajada afectado por QoS e IPSec 30
5.4 Comparación del throughput de bajada limitado por la QoS, sin y con IPSec 30
5.5 Evolución del throughput de subida al incrementar los usuarios, con QoS 31
5.6 Throughput de una llamada en función del tiempo 31
5.7 Throughput de contenido de youtube 32
5.8 Throughput de contenido de youtube y llamada simultáneos . 32

Lista de Tablas

3.1 *Distancia enlaces red Napo* 16
3.2 *Efectos del retardo en servicios de telefonía 3G* 18
3.3 *Estimación tráfico para 16 usuarios* 20

4.1 *Parámetros de los enlaces inalámbricos* 22

5.1 *Resultado Iperf. Capacidad en kbps de los enlaces para IPSec y QoS.* 27

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) están cada vez más presentes en la vida de las personas. Su crecimiento es inmenso, y se han convertido en una herramienta, a menudo insustituible para satisfacer necesidades básicas. El uso de las TIC se encuentra estrechamente vinculado a la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, y actualmente a la agenda Post-2015. Ya son consideradas un derecho básico a universal, y pueden colaborar en todas las metas propuestas, desde las vinculadas a la economía, como a las de salud o educación [1] [2]. Sin embargo, su continuo crecimiento no llega igual a toda la población mundial, creando la llamada Brecha Digital. Este fenómeno hace que que se genere una diferencia social y económica entre la población que tiene acceso a las TIC y la que no lo tiene. Más concretamente, la Brecha Digital depende de tres condiciones: la disponibilidad de infraestructura que permita la conectividad, la accesibilidad de la población a estos servicios en el aspecto económico, y la capacitación en cuanto a conocimientos y habilidades de esta población para el correcto aprovechamiento de las tecnologías [3]. El conjunto de estas tres condiciones se concentra en su mayoría en zonas rurales, especialmente en los países en vías de desarrollo. Las razones principales son las barreras geográficas y económicas. Las dificultades geográficas que presentan estas zonas aisladas para realizar la instalación de infraestructura se ven acentuadas por la poca retribución económica esperable, debido a la escasa concentración de población y a sus limitaciones económicas.

La motivación del proyecto TUCAN3G surge de esta problemática, proponiendo soluciones tecnológicas eficientes y de bajo coste para hacer llegar telefonía y datos a zonas rurales aisladas.

1.2 Proyecto TUCAN3G

El proyecto en el que se enmarca este TFG es el TUCAN3G (Wireless technologies for isolated rural communities in developing countries based on cellular 3G femtocell deployments). TUCAN3G es un proyecto de investigación enmarcado en el programa FP7 de la Unión Europea cuya principal motivación es dar acceso a las TIC en zonas rurales aisladas de países en vías de desarrollo mediante femtoceldas 3G. Lo forman un consorcio de entidades entre las que se encuentran EHAS (Enlace Hispanoamericano de Salud), la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Telefonica del Perú, la Universidad del Cauca (UCA), el Fondo de Inversiones en Telecomunicaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (FITEL) y la empresa IP Access [4].

El proyecto busca hacer llegar servicios de voz y datos a zonas aisladas en países en vías de desarrollo. A pesar de su constante crecimiento en todas partes del mundo, esta penetración no se produce de igual manera en zonas rurales y zonas urbanas, haciendo que a las más aisladas el servicio no llegue o sea de mala calidad. Sin embargo, la demanda existe. Como se ve en la figura 1.1, la telefonía móvil es la tecnología más extendida tanto en zonas rurales como en urbanas, incluso en situaciones de pobreza, aunque se aprecia una considerable diferencia entre unas zonas y otras. Los objetivos del TUCAN-3G son reducir esos obstáculos que impiden la penetración de las TIC en zonas rurales aisladas y proponer un modelo de negocio y tecnología adaptable a cualquier parte del mundo con estas características.

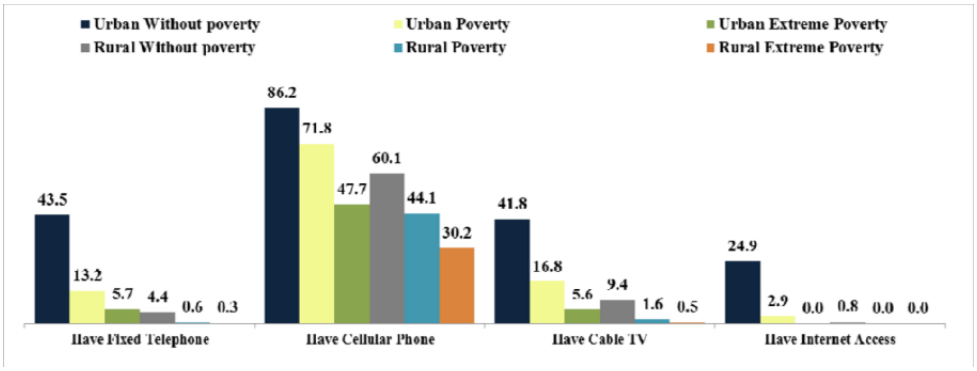

Figura 1.1: *Viviendas con acceso a las TIC en función de su pobreza y área residencial [33]*

En primer lugar, se propone una solución formada por una red de acceso basada en femtoceldas 3G y una red de transporte heterogénea basada en enlaces inalámbricos adaptados a larga distancia: WiLD (WiFi Long Distances), WiMAX y VSAT (Very Small Aperture Terminal). La

combinación de estas tecnologías en una red multisalto permite conseguir una infraestructura mucho más interesante para zonas rurales aisladas que la opción acual basada en satélite o despliegue terrestre. Con esta propuesta un sólo enlace satelital puede dar servicio a varias poblaciones y se reducen los costes económicos, energéticos y de mantenimiento, lo que favorece la implicación de operadoras en la instalación y gestión de las redes. Además de esta propuesta técnica, otra parte del trabajo implicado en el proyecto ha sido realizar un estudio de mercado en este tipo de zonas y una propuesta de modelo de negocio que demuestra la rentabilidad económica de las tecnologías inalámbricas para acceder a zonas rurales a las que hoy día no se da acceso por escasez de usuarios para hacer rentable un enlace satelital.

Como demostración, el proyecto cuenta con dos redes piloto en la Amazonía Peruana: la red de Balsapuerto basada en WiLD y fibra óptica y la del Río Napo, formada por enlaces WiLD, WiMAX y VSAT. De esta forma se verifican las soluciones, tanto técnicamente como desde el punto de vista de negocio, y se optimiza la propuesta para poder expandirla y replicarla en otras partes del mundo. Este TFG se ha centrado en la red de transporte del río Napo dada la variedad de tecnologías inalámbricas empleadas, abarcando de esta manera un mayor campo de estudio.

1.3 Red piloto en el Río Napo

El Río Napo se encuentra en el departamento de Loreto, en Perú. Es una zona de selva de difícil acceso que ya ha albergado proyectos de telemedicina con EHAS y el GTR [5]. El conocimiento previo de la zona, sus características geográficas y la predisposición de la población local hicieron que se decidiese llevar a cabo una de las redes piloto del proyecto TUCAN3G en esta zona.

El departamento de Loreto es el más extenso del país, con 369 mil km2 de territorio amazónico (figura 1.2). Lo habitan un 1,02 millones de habitantes, con una densidad de población de 3,2 habitantes por km2 (frente a los 269.1 de Lima). Es una zona en su mayoría llana por la que transcurren grandes ríos ,siendo este, con el Amazonas y el Marañón los más importantes. El departamento limita al norte con Colombia y Ecuador, al este con Brasil, y al sur y oeste con los departamentos peruanos de San Martín y Amazonas. Su capital es Iquitos, la ciudad a la que sólo se puede acceder en transporte fluvial o aéreo más grande del mundo. El departamento se divide en siete provincias, de las cuales cuatro concentran el 80% de su población total. Se trata de un departamento muy marcado por la desigualdad. Su despegue económico se produjo con el boom del caucho, época que aportó mucha riqueza a parte de la población de Iquitos. Sin embargo, la otra cara de la situación ha sido la población indígena (aproximadamente el 40% de las comunidades

Figura 1.2: *Río Napo, Departamento de Loreto, Perú*

indígenas del Perú se encuentran en Loreto), la cual ha visto reducidos sus recursos naturales por la abusiva explotación forestal del territorio y no ha podido hacer frente a estos abusos de manera legal. Estas circunstancias hacen que Loreto sea uno de los departamentos con más desigualdad del Perú, reflejándose en el nivel de ingresos económicos y en la educación, la malnutrición infantil o el acceso a servicios sanitarios.

Las principales fuentes de ingresos son la agricultura, la explotación forestal y la pesca. Además, el departamento cuenta con reservas de petróleo. En la actualidad, Iquitos se presenta como importante destino turístico para turismo de selva, por lo que en este aspecto la economía está encontrando otra forma de crecimiento [6].

Los pueblos que participan en la red del Napo de este proyecto son Tuta Pishco, Negro Urco y Santa Clotilde. Estas zonas no reciben turismo, entre otras cosas por su difícil acceso. Para llegar desde Iquitos existen servicios comerciales que pasan una vez al día, y demoran por trayectos 1h45 hasta Tuta Pishco, 3 horas a Negro Urco y 5h30 a Santa Clotilde [7].

Este problema de comunicación es el que hace el acceso a telefonía e internet tan interesante en estas zonas. Permite ahorrar costes de transporte, facilitar la atención en caso de emergencias o conectar a la población con sus familias migradas a núcleos urbanos por razones económicas. La telefonía móvil se considera la mejor opción para cubrir estas necesidades de comunicación, considerando el modelo de prepago como el más accesible para estas poblaciones. En zonas rurales este es el contrato preferido debido a que los usuarios la consideran la opción más asequible, que además les permite controlar su consumo y es más fácil de conseguir que el servicio de postpago (que requiere cuentas bancarias y un proceso más complejo de contratación)

[8]. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, en Loreto sólo el 59% de los hogares tienen al menos un teléfono celular, datos que reflejan la realidad en Iquitos y grandes ciudades, pero cubren el aislamiento de zonas más rurales. [9]. Telefonica del Perú, por ley, tiene la obligación de dar acceso a las zonas rurales del país [10]. Se convierte así en un socio potente, ya que colaborando en estas redes de Balsapuerto y Napo, puede verse interesado en adoptar este modelo de negocio para otros proyectos y servir de ejemplo para replicarlo en otras partes del mundo.

1.4 Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado surge de la colaboración de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), mediante la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) a través de la Fundación EHAS (Enlace Hispanoamericano de Salud), y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) a través del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR). Se enmarca dentro de los TFG en Cooperación al Desarrollo, gracias a los cuales se lleva a cabo un intercambio de conocimientos y experiencias entre ambas entidades con el fin de concienciar a los estudiantes y docentes, y aplicar la Ingeniería a proyectos sociales en países en vías de desarrollo.

El objetivo general de este TFG es implementar una maqueta de la red de telefonía 3G propuesta para el piloto del proyecto TUCAN3G en el laboratorio del GTR para verificar el comportamiento de la red de transporte. En esta maqueta se validarán las configuraciones y soluciones propuestas en el proyecto, como paso previo al despliegue en terreno.

1.5 Metodología

- En primer lugar se analizará la documentación previa del proyecto TUCAN3G para comprender las tecnologías involucradas en la red de transporte y los requisitos de ésta.

- A continuación se realizará la configuración de la red de backhaul del Río Napo en el laboratorio del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR) y se verificará su conectividad y capacidad. Esto se hará empleando el siguiente software:

    - Sistemas operativo GNU/Linux Ubuntu Desktop 12.04 LTS, instalado en los ordenadores empleados para simular la red de acceso y el core.

  - Wireshark. El analizador de protocolos se ha utlizado para realizar capturas de tráfico y verificar los comportamientos esperados en la red.
  - Iperf. Es un sofware que permite medir el ancho de banda de un enlace tanto en UDP como en TCP [11].
  - D-ITG-2.8.0-rc1(Distributed Internet Traffic Generator). D-ITG es un software de generación de tráfico que permite variar parámetros como el tamaño de paquetes, la tasa binaria, o la etiqueta DSCP [13].

- Para simular la red de acceso lo más fiel posible a la que establecerán las femtoceldas, se implementarán túneles IPSec entre los terminales clientes y el CORE, cifrando la información y verificando que se duplican sus cabeceras fuera de los paquetes encapsulados.

- Para reproducir el tráfico esperado, se diseñarán scripts mediante D-ITG y se lanzarán a la red de transporte. Estos se probarán también limitando la capacidad de la red a la del enlace satelital mediante colas HTB en los routers.

- Se estudiará la respuesta de los enlaces en términos de throughput, retardo y pérdida de paquetes, y se verificarán los valores estimados en la fase de investigación.

- Una vez se hayan asegurado estas condiciones y esté instalado el controlador de las femtoceldas, se conectará la red de transporte al controlador y las femtoceldas en laboratorio de Telefónica, paso previo a la instalación en terreno. Allí se comprobará la conectividad de todas las partes de la red y se analizará la respuesta de la red a los distintos tipos de tráfico (voz, datos y señalización).

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

En este capítulo se hará una introducción a las tecnologías que se han considerado y se utilizan en las redes de transporte de la red del Napo. Las redes planteadas por el proyecto TUCAN3G son redes heterogéneas, lo que significa que combinan distintos tipos de tecnologías, arquitecturas y protocolos, en función del tipo de salto que deben comunicar. Las tecnologías consideradas en este caso son WiFi for Long-Distances (WiLD) , WiMAX y comunicaciones por satélite. Algo a tener en cuenta para esta red de transporte es que, a diferencia de las redes tradicionales que siempre se sobredimensionan, esta va a verse restringida a las posibilidades de la red de acceso, para reducir los costes.

A continuación se describirán los aspectos más relevantes de los estándares de las tres tecnologías de larga distancia consideradas, y se analizará la adecuación de estas a los requisitos de la red del Napo. Para ello se caracterizarán las tecnologías en términos de throughput, retardo, distancia que pueden cubrir y coste del despliegue y el mantenimiento. Por último, se explicarán brevemente las características y posibilidades de una red de acceso formada por femtoceldas.

2.2 Estado del arte de las tecnologías inalámbricas de larga distancia

2.2.1 Estándar IEEE 802.11

Los primeros estándares de WiFi fueron publicados en 1999 (IEEE 802.11a [14] y IEEE 802.11b [15]) y en la actualidad se siguen añadiendo

modificaciones. A lo largo de las distintas versiones del IEEE 802.11b se aportan especificaciones de la capa física y la capa MAC (capa de acceso al medio) que permiten optimizar y ampliar las posibilidades de esta tecnología, que en su origen fue planteada como una tecnología inalámbrica de red local (WLAN).

El estándar define dos tipos de nodos -puntos de acceso AP (Acces Point) y estaciones STA (stations)- y dos modos de funcionamiento: Infraestructura y Ad-hoc. En el modo ad-hoc, empleado en redes malladas, sólo se consideran nodos STA, que no necesitan APs para conectarse ya que todos tienen la misma jerarquía. En el modo infraestructura se establecen los enlaces entre un nodo AP y otro STA, siendo los nodos AP los encargados de controlar el acceso a la red del tráfico de los otros nodos.

En cuanto a la capa física, las opciones comercializadas de multiplexación y codificación de canal son DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) y una ampliación de esta llamada HT PHY. De esta capa y de estas opciones dependerá la tasa binaria proporcionada por el enlace, los canales que se puedan usar y el número de usuarios que se pueda soportar. DSSS [16] usa técnicas de espectro ensanchado que hacen que la decodificación sea muy compleja para cualquier equipo ajeno a la comunicación establecida por el aspecto de ruido de las señales transmitidas, pero que esta sea sencilla para el destinatario concreto. Esto hace que se consiga soportar una mayor cantidad de usuarios dada la protección contra usuarios indeseados. Responde bien a interferencias, permite altas tasas binarias y enlaces robustos, pero consume bastante potencia y resulta caro. Se usa en los estándar IEEE 802.11b y en IEEE 802.11g. [17]. Por otro lado, la OFDM es una técnica de modulación multiportadora que evita eficientemente la interferencia entre símbolos. Divide los flujos en subflujos y los envía por canales ortogonales que permiten un uso muy eficiente del espectro y hace que sea muy robusta frente a errores de retardo. Por contra, es sensible a errores de frecuencia que pueden destruir esta ortogonalidad. Se emplea en IEEE 802.11a, IEEE 802.11g , IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac y IEEE 802.11ad. [18]. Por último, HT PHY, en sus versiones revisadas de los estándares IEEE 802.11n y IEEE 802.11ac, permite mayores valores de throughput empleando técnicas de OFDM pero con mayor número de portadoras. Además, la posibilidad de combinarse con técnicas MIMO (Multiple In Multiple Out) que soportan mayor número de antenas sin interferencias, permite mejorar la cobertura y el alcance, la calidad en recepción y mejorar la SINR. Con el uso del MIMO aparecen los MCSs (Modulation and Codification Schemes) [19], que son combinaciones de tasas binarias, modulaciones y flujos espaciales empleados para adaptar el envío a las condiciones del canal y así conseguir mayor robustez, tasa binaria, o alcance. En el capítulo 3 se detallarán los MCSs más empleados para larga distancia.

El resto de especificaciones del estándar se refieren a la capa MAC, que puede variar considerablemente el throughput a nivel IP. Los tres modos más extendidos de acceso al medio son:

- Mediante reserva de recursos. Con este método, un nodo coordina el acceso al canal, que está dividido en time-slots de tamaño fijo en el caso de TDMA (Time Division Multiplex Access) o en frecuencias para FDMA (Frequency Division Multiplex Access). El más usado en este tipo de enlaces es TDMA. Sus ventajas con la sencillez de implementación y el poco retardo que introduce. Además, puede garantizar QoS al tráfico y no se ve afectada por la distancia del enlace. El inconveniente, sobre todo dado el tráfico a ráfagas característico de las redes WiFi actuales, es que no es flexible en la ocupación del canal, lo que se traduce en ineficencia en su aprovechamiento.

- Mediante contienda. Las estaciones que requieren servicio envían un mensaje al controlador para solicitarlo. Este proceso puede realizarse con o sin escucha, para evitar colisiones. El método más común en WiFi es CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), basado en escuchar el canal para saber cuándo se puede transmitir, ofreciendo un servicio *best effort* que no permite garantizar un ancho de banda ni retardo fijos pero sí es muy adaptable al crecimiento del número de usuarios. No obstante, no responde bien ante enlaces de larga distancia debido a la necesidad de alargar los tiempos de escucha que hacen que se reduzca notablemente el rendimiento.

- Híbridos, combinando reserva y contienda. Suelen añadir la utilidad de un paquete *poll* que informa a los clientes cuándo empezar y terminar de transmitir. Combinan la flexibilidad de las MAC por contienda con la fiabilidad de la reserva de recursos, pero no se puede emplear en modo ad-hoc por la necesidad de jerarquización y control. Tecnologías no estandarizadas como NV2 [20] o AirMAX [21] emplean este tipo de acceso al medio.

Las recomendaciones en la configuración de las capas física y MAC han permitido entre otras mejoras:

- Trabajar en las bandas de 2.4 (IEEE 802.11 b,g,n), 3.6(IEEE 802.11 a), 5(IEEE 802.11 a,n,ac)y 60 GHz ((IEEE 802.11 ad).

- Trabajar con anchos de banda de hasta 160 MHz ((IEEE 802.11 ac), cuando los primeros estándares sólo disponían de 20-22 MHz.

- Transmitir a una gran variedad de tasas binarias, que van desde los 6 Mbit/s (IEEE 802.11 a,g) a los 6.75 Gbit/s (IEEE 802.11 ad), en función de la modulación empleada.

- Permitir soporte para calidad de servicio (QoS) y diferenciación de tráfico.
- Ampliar las posibles distancias de los enlaces hasta los cientos de kilómetros.

2.2.1.1 WiFi en larga distancia (WiLD)

El estándar 802.11 estaba diseñado orginialmente para interiores, con distancias máximas de 300m. WiLD se crea como una adaptación de WiFi a enlaces de largas distancias (decenas de km) y esta aplicación desde el comienzo apreció su utilidad en zonas rurales. Como se observaba al comienzo del documento [22], la baja densidad de población propia de este tipo de zonas y las características geográficas hacen de las redes inalámbricas la mejor opción para hacer llegar las TIC hasta ellas.

En cuanto al comportamiento de la capa física, se entiende que sus mayores problemas vendrán de la reducción de RSSI que sufrirá el enlace con la distancia. Existen ciertas limitaciones legales sobre la potencia transmitida que también afectan a las posibilidades de esta tecnología y que varían en cada país [24].

En lo referente a la capa MAC, las adaptaciones tienen que ver principalmente con los tiempos: la confirmación del ACK, los *slot-time* y en general considerar el tiempo de propagación más largo para que no entre en *timeout*. Otro enfoque para reducir estos tiempo es reducir la carga en cabeceras, realizando agregación de tramas (teniendo en cuenta el tamaño de estas y el número de tramas agregadas [25]).

Sin embargo, algunas de las opciones más adaptables y prácticas de WiFi en largas distancias son las soluciones no estandarizadas, que optan por una MAC TDMA que evite colisiones y ofrecen equipos de bajo coste. En el capítulo siguiente se detallarán ejemplos de estas, pues se usan en TUCAN3G (Mikrotik, Ubiquiti).

2.2.2 Estándar IEEE 802.16

El estándar IEEE 802.16 (en su versión de 2004 [26]y de 2009 [27])asociado a comunicaciones WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) se comercializa con el nombre de WiMAX (Worldwide Interoperability of Microwave Access). Como los estándar de WiFi, proporciona una serie de especificaciones relacionadas con la capa física y la capa MAC.

Los tipos de nodos de esta tecnología son la estación base BS, y las estaciones subscriptoras, que pueden ser móviles (MS) o fijas (SS). Los enlaces más empleados (para los que fue diseñado el estándar) son punto-multipunto

(PtMP), y permiten trabajar con o sin lÍnea de visión entre los 2 y los 66 GHz.

Las opciones de capa física que plantea puedes ser de una sola portadora (Wireless-MAN-SCa), basada en OFDM (Wireless-MAN-OFDM), en OFDMA (Wireless-MAN-OFDMA) o trabajar en bandas no licenciadas (Wireless-HUMAN). La mayoría y las más usadas están basadas en OFDM dadas sus ventajas en enlaces sin línea de vista (NLOS) y de banda ancha: su eficiencia espectral, protección contra interferencias, la demodulación coherente o su baja complejidad las hacen muy atractivas para este tipo de enlaces. Como WiFi, también soportan MIMO, lo que facilita las conexiones de larga distancia.

La capa MAC emplea una mezcla de TDMA y *Polling*, que permite garantizar una determinada QoS ya que cada subscriptor al intentar transimitir indica la que precisa, y la estación base decide cuánto darle considerando el estado del canal. Para clasificar el tráfico se emplea el nivel IP con las etiquetas DSCP.

2.2.2.1 WiMAX en larga distancia

Muchas son las características que hacen que WiMAX sea considerada la tecnología idónea para acceder a zonas rurales aisladas. [28] Sus posibilidades de trabajar con o sin línea de vista, su eficiencia al ofrecer calidad de servicio y la caída de precios de los equipos debido a su estandarización hacen que sea una opción más que considerable. Principalmente es su uso de TDMA el que hace que responda sin problemas ante grandes distancias.

Sus limitaciones son similares a las de WiLD. También se enfrentan a limitaciones de potencia isotrópica radiada equivalente (EIRP) y ven decrecer sus tasas binarias con la distancia debido a la necesidad de emplear modulaciones más robustas para garantizar una recepción sin errores. La gran diferencia de WiMAX con WiLD es el coste de los equipos, más elevado en WiMAX; y la falta de un estándar tan robusto como el de WiFi, que hace que cada fabricante utilice adaptaciones diferentes que resultan más difícil de compatibilizarse entre ellas.

2.2.3 Comunicaciones por satélite

La primera tecnología que se consideró para conectar zonas rurales fue VSAT (Very Small Aperture Terminal), y aún hoy es una opción potente. Aunque existen estándares, no están tan extendidos como en las tecnologías anteriores, haciendo que cada fabricante emplee sus propias soluciones. Debido a esto, pueden surgir incompatibilidad de equipos procedentes de distintos fabricantes, lo que encarece las instalaciones.

Las posibilidades de red son muy extensas, pero en este contexto se han tenido en cuenta el modo TDM/MF-TDMA y SCPC. El primero consiste en aplicar una arquitectura de estrella, donde cada nodo se conecta al nodo central el cual podría implementarse en VSAT. El segundo, sin embargo, se basa en enlaces punto a punto.

SCPC no tiene estándares oficiales, así que depende del fabricante. Generalmente en la capa fisica cuenta con mecanismos codificación y modulación adaptativa (ACM) que le permiten adaptar sus modulaciones y codificaciones al estado del canal. Sin embargo, sus caracteristicas se centran en enlaces punto a punto de ancho de banda cosntante, lo que hace que no sea muy indicado para tráfico a ráfagas.

Para TDM/MF-TDMA sí existen estándares: DVB-RCS2 (un estándar abierto), IPoS y S-DOCSIS (que son industriales). DVB-RCS2 combina las tecnologías de banda ancha de DVB-S2 y RCS-2. [29]. Consta de dos canales: el de difusión FW y el de retorno RT. Ambos canales soportan varias modulaciones y tasas de codificación que se combinan para adaptar el MCS al estado del canal, ya que uno de los principales problemas de VSAT son los errores causados por la atenuación, debida a las distancias y a las condiciones atmosféricas. El canal FW emplea TDM para gestionar el canal, dividiendo este en *time slots* que se agregan en una trama más grande. El canal RT emplea TDMA en su versión multifrecuencia (MF-TDMA), pudiendo realizar saltos de frecuencia en función de la QoS requerida. IPoS busca la conectividad con redes IP, por lo que el estándar regula esta capa, y las capas MAC y física quedan a elección del fabricante. Para conseguir esto define una nueva capa SI-SAP (Satellite Independent Service Access Point) que hace de interfaz de comunicación entre las capas superiores e inferiores. S-DOCSIS es la adaptación del estándar de televisión por cable DOCSIS a satélite. Al igual que su predecesor, emplea S-CDMA, un método determinista que surge de la combinación de TDMA y CDMA que busca evitar las colisiones.

2.2.3.1 VSAT en zonas rurales

VSAT responde sin problemas a los requerimientos de enlaces de zonas rurales, ya que puede alcanzar cualquier localización sin importar la cantidad de usuarios, y no requiere grandes despliegues de infraestructura ni mantenimiento.

Sin embargo, su principal inconveniente es el coste del alquiler de ancho de banda satelital, que hace que sólo las operadores puedan desplegar estos enlaces.

Aunque iniciativas en Zambia [30] y China [31] avalan la viabilidad técnica de VSAT en este tipo de zonas, el mayor inconveniente es el coste. En resumen, sin un operador gestionando la red y sin suficientes usuarios

para aprovechar el ancho de banda disponible no resulta una solución viable económicamente, aunque técnicamente no presenta inconvenientes.

2.3 Femtoceldas para redes de acceso en zonas rurales

Es importante contextualizar la red más en detalle, ya que la configuración de la red de transporte ha estado condicionada por el servicio que busca prestar pero también por la red de acceso que se va a implementar. El servicio de las redes del TUCAN3G está orientado a soportar telefonía y datos 3G. Para este tipo de tráfico, y dado el reducido número de usuarios localizados en zonas rurales, una red de acceso compuesta por femtoceldas resulta una opción muy interesante.

30 años atrás se empleaba el término *small cell* para denominar las celdas de área metropolitana, pero finalmente la idea se fusionó con la investigación en *boosters* o repetidores, para llegar al concepto que existe en la actualidad. Una femtocelda es una estación base a pequeña escala, cuyo principal mercado son viviendas y empresas. Se conecta a la red de banda ancha y ofrece una ampliación del área de cobertura del operador de telefonía 3G. El enfoque que interesa en este proyecto son las femtoceldas empleadas en exteriores, que ya son consideradas una opción para telefonía rural, tanto en países en vías de desarrollo como en países desarrollados [32]. Las principales características que las hacen atractivas para este tipo de servicio es su bajo coste dada su alta comercialización, su bajo consumo energético, y su autosuficiencia que no requiere gestión externa. Pueden cubrir distancias de 1 a 2 km, y soportar 16 usuarios simlutáneamente, con voz y datos 3G. En el caso de las redes del proyecto, el máximo que se instalarán son dos femtoceldas por localidad, que en un principio es suficiente para cubrir la demanda [33].

La instalación de femtoceldas en estas zonas requiere tres condiciones:[34]

- Localización: La femtocelda debe situarse en una zona alta y céntrica para que alcance el máximo área útil posible. Si esto no es posible, se deben usar torres y apoyar su directividad con antenas omnidireccionales o direccionales.

- Alimentación: El bajo consumo de los equipos (100W como máximo) hace que sea posible alimernarlos con la red doméstica. En el caso rural, una sencilla instalación solar o eólica con una batería auxiliar es suficiente para su correcto funcionamiento.

- Backhaul: La principal función de la red de backhaul es permitir a la femtocelda conectarse con el controlador y sincronizarse de manera que pueda acceder a la red exterior. Sin red de transporte las femtoceldas quedan incomunicadas, por lo que se debe garantizar la conectividad y ofrecer más throughput del que inyectan las femtos.

Además de las características anteriormente mencionadas, cabe destacar dos más. Por una parte, el uso de calidad de servicio (QoS), que etiqueta el tráfico para que posteriormente sea gestionado por la red. De esta forma se puede priorizar la voz y la señalización para que se garantice su correcta recepción frente a los datos, los cuales se limitarán al throughput restante disponible. Por otro lado, la forma en que el core se conecta con las femtoceldas es identificándolas con su número de serie, lo que hace que no se puedan introducir usuarios no deseados y sea una conexión segura. Además si se asigna una dirección dinámica a la femtocelda, dentro de una subnet establecida, se permite que se puedan añadir nuevas femtos a la red y que estas puedan reemplazarse por otras sin problemas en caso de incidentes. En resumen, el uso de femtoceldas para redes de acceso de zonas rurales es altamente recomendable por sus posibilidades de autogestión, su adaptabilidad y su bajo coste.

2.4 Conclusiones para la red de Napo

Tras detallar cada tecnología para la red de backhaul, se concluye que WiLD y WiMAX son tecnologías menos costosas, que pueden tener un alcance suficiente para la red del Napo en concreto. En la figura 2.1 se comparan el throughput que garantizan distintas tecnologías para distintas distancias. Como se aprecia en la figura, mayores distancias conllevan codificaciones menos robustas. VSAT en distancia no tiene problema, pero es una solución más costosa, que será útil para conectar esta red rural a la red central. En cuanto a la red de acceso, se ha explicado la idoneidad de las femtoceldas y sus potencialidades para la red en cuestión.

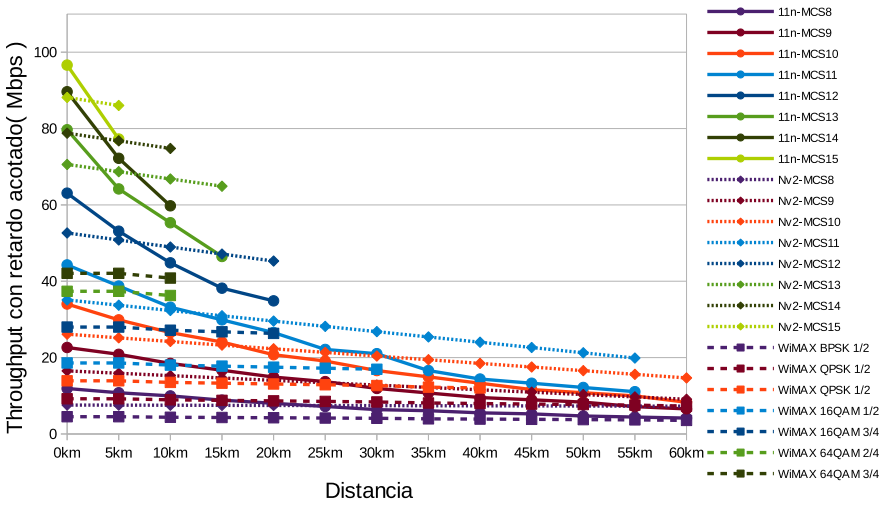

Figura 2.1: *Comparación throughput en función de la distancia para distintas tecnologías. [35]*

CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DE LA RED DE TRANSPORTE

3.1 Contexto técnico específico de la red del Napo

Como se ha visto en el capítulo anterior, no se puede concluir que exista una tecnología definitiva para zonas rurales aisladas: las ventajas técnicas pueden suponer altos costes, puede ser necesaria línea de visión y no ser posible, o pueden darse condiciones atmosféricas o geográficas adversas. La solución por la que se ha optado en el proyecto, es crear una red de transporte heterogénea, combinando varías tecnologías para aprovechar sus situaciones más favorables y conocer más sobre ellas. En primer lugar es importante conocer las condiciones de los enlaces. Las distancias entre los pueblos que comunica la red del Napo se aprecian en la tabla 3.1 y su localización geográfica en la figura 3.1. Los pueblos en los que se van a localizar las femtoceldas son Negro Urco, Santa Clotilde y Tuta Pishco, con 316, 3222 y 344 habitantes respectivamente (incluyendo población en itinerancia).

Enlace	Distancia (km)
Tuta Pishco - Negro Urco (T1)	29.69
Negro Urco (T1) - Negro Urco (T2)	1.68
Negro Urco (T1) - Tacsha Curaray	28.58
Tacsha Curaray - Santa Clotilde	39.06

Tabla 3.1: *Distancia enlaces red Napo*

El objetivo de la red de transporte es conectar las femtos al controlador que se encuentra en Telefonica en Lima. Cuatro enlaces satelitales no son viables económicamente, y además no tienen sentido en este contexto en el

Figura 3.1: *Poblaciones conectadas por la red del Napo*

que es probable que en un futuro próximo se amplíe la red a otras localidades. La opción, dado que el punto más próximo a la red de Telefonica se encuentra demasiado lejos como para establecer un enlace terrestre, es conectar el controlador a un router de borde mediante VSAT, comunicando la red del Napo con el exterior. Como se mencionó en el capítulo anterior el alquiler de ancho de banda satelital es una opción interesante sólo para las operadoras, por lo que la colaboración de Telefonica lo hace posible en este caso.

La figura 3.2 muestra la disposición final de la red. A partir del router de borde, el resto de saltos se realizan con WiMAX, NV2 y AirMAX. En cada una de las localidades se instalarán dos femtoceldas S16, capaces de soportar 16 usuarios a la vez. Dado que el salto entre Santa Clotilde y Negro Urco es demasiado largo, se ha planteado un nodo en Tacsha Curaray. A continuación se explican los equipos empleados y sus funciones y configuraciones.

3.2 Requerimientos de la red de transporte

Para que la conexión se haga correctamente entre la red de acceso y el núcleo es necesario que la red de transporte cumpla ciertas condiciones, garantizando ciertos valores en parámetros cruciales para un buen servicio.

- Latencia. Las consideraciones de IP Access -proveedor de las femtoceldas [36]- respecto a la latencia se aprecian en la tabla 3.2. Este retardo es más condicionante en los servicios de tiempo real, razón por la que se prioriza la voz y la señalización.

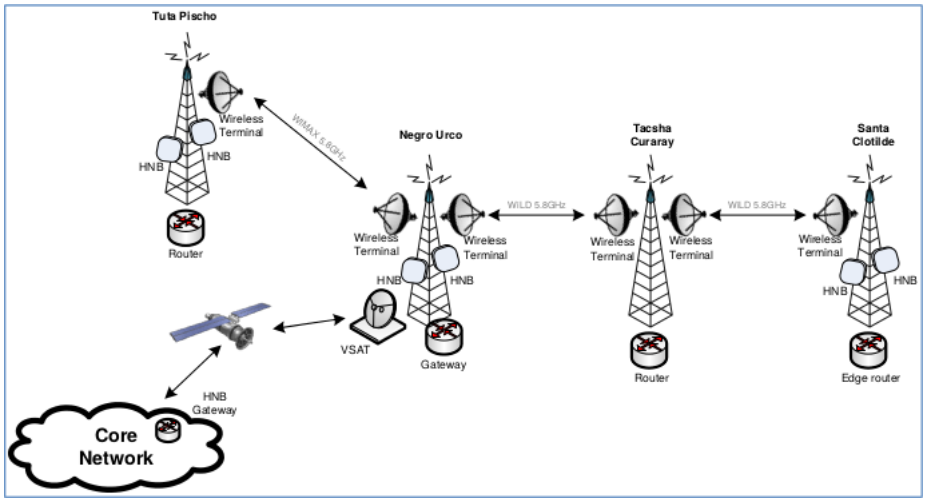

Figura 3.2: *Esquema de la red del Napo*

Retardo	Efecto
<1ms	Despreciable
1-10 ms	Bajo
10-60 ms	Aceptable para juegos
>60 ms	Potencialmente aceptable (depende del servicio)

Tabla 3.2: *Efectos del retardo en servicios de telefonía 3G*

- Capacidad. La capacidad de la red de transporte siempre debe ser mayor al tráfico generado por la red de acceso. La capacidad requerida se detalla en [37] y [38]. Como se verá en las pruebas, los enlaces de WiMAX o WiFi no presentan grandes problemas para la capacidad; será el enlace satélite el que actúe como cuello de botella, condicionando el volumen de tráfico en la red.

- QoS. Como se ha mencionado anteriormente, es necesario gestionar el tráfico con etiquetas DSCP para garantizar que los servicios a tiempo real tengan mayor prioridad que el resto. Los parámetros que más influyen a este tipo de tráfico son el jitter y la latencia, que cuanto más constante la primera, y menor la segunda mejorarán la calidad de la comunicación de voz.

3.3 Equipos

La red de transporte está formada por routers IP, y los enlaces que los conectan. Los router se encargan de encaminar el tráfico que llega a sus interfaces, tanto cableadas como inalámbricas. Además, en esta red realizarán gestión de paquetes mediante QoS. A continuación se muestra una lista de los equipos que conforman la red del Napo.

- 7 placas Alix (2d2) con arquitectura x86, cada una con dos tarjetas PCI inalámbricas Routerboard R52 con soporte para IEEE 802.11 a/b/g y sin capacidades de MIMO. Funcionan con el sistema operativo Voyage GTR 0.6.5,desarrollado por el GTR y basado en Debian; y poseen dos interfaces FastEthernet.

- 4 placas Mikrotik boards RouterBOARD 433G cada una con chips Mikrotik RouterBOARD R52Hn. Las placas soportan SISO y MIMO de hasta 2x2 y pueden trabajar tanto con IEEE 802.11 a/b/g/n como con NV2. Utilizan el sistema operativo RouterOS 6.27 y tienen 3 puertos Gigabit Ethernet.

- 2 equipos Ubiquiti Rocket M5 con capacidades de SISO y MIMO de hasta 2x2. Soportan IEEE 802.11 a/b/g/n y AirMAX. Emplean el sistema operativo airOS 5.5.

- 1 estación base WiMAX Albentia PRO-BS-1150, para la banda no licenciada 5 GHz, compatible con el estándar IEEE 802.16-2009 para WiMAX Fijo. Tiene una antena omnidireccional incorporada de 15 dBi.

- 1 estación subscriptora Albentia PRO-SU-115, para la banda no licenciada 5 GHz y compatible con el estándar IEEE 802.16-2009 para WiMAX Fijo. Las SS llevan integradas antenas de array internas de 16dBi protegidas por un radomo.

3.4 Estimación de tráfico

Lo más importante para diseñar la red de transporte es el tráfico que va a soportar, que viene dado por la forma de transmitir de las femtoceldas. En el documento [39] se detalla la generación de este tráfico, que ha guiado los cálculos para diseñar los scripts de tráfico usados en las pruebas (Anexo 1).En la tabla 3.3 se detalla el consumo en kbps tanto en uplink como en downlink para cada usuario de cada uno de los tráficos. En la penúltima y última columna se estima el tráfico total generado en las estaciones con una sola femtocelda (Negro Urco 2 y 3) y con dos (Tuta Pishco y Santa Clotilde). Este tráfico, como se detalla en el apartado pruebas, se va a ver limitado por el enlace de menos capacidad de la red,que será el satélite con 2,6Mbps de uplink y 3Mbps de downlink.

	Voz	Datos	Señalización	Total	16 usuarios	32 usuarios
Uplink (kbps)	20	133,33	1,5333	154,8633	2477,8128	4955,6256
Downlink (kbps)	18,8	400	4,188	422,988	6767,808	13535,616

Tabla 3.3: *Estimación tráfico para 16 usuarios*

CAPITULO 4

IMPLEMENTACIÓN

4.1 Instalación en el laboratorio del GTR

4.1.1 Diagrama de red y direccionamiento

La conectividad de los equipos y la estructura de la red se basa en la figura 4.1 . A partir de ella se han realizado las configuraciones que se detallan a continuación.

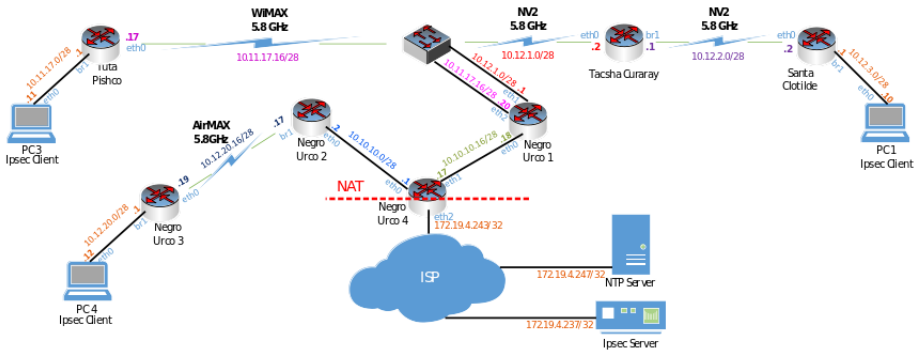

Figura 4.1: *Diagrama de red*

El primer paso ha sido configurar el direccionamiento y enrutamiento entre los distintos equipos para conseguir conectividad. El direccionamiento se configura en el fichero interfaces que se encuentra en /etc/network/interfaces en las ALIX, asignándole a las interfaces deseadas una dirección a la que se especifica la máscara y el gateway.

En cuanto al enrutamiento, se ha hecho de manera estática dado el pequeño tamaño de la red, pudiendo controlar mejor cada uno de los enlaces y procesándose más rápido. Los principales parámetros a indicar son la red de destino y su máscara, y a través de qué equipo se debe llegar a ella.

4.1.2 Configuración de los enlaces inalámbricos

La configuración de las interfaces inalámbricas ha seguido las especificaciones indicadas en los documentos [16] y [37], se muestran en la tabla 4.1. Se han definido los enlaces inalámbricos en modo bridge para que sean las ALIX las que direccionen la red y gestionen el tráfico, ya que usando Debian resulta más uniforme y sencillo de configurar que cada uno de los equipos (Mikrotik, Ubiquiti y WiMAX).

Enlace	**WIMAX-TP**	**MKT-TC**	**MKT-SC**	**NB-NU**
Procolo Inalámbrico	WiMAX	NV2	NV2	AirMAX
Canal (GHz)	5,5	5,82	5,78	5,24
Ancho de banda (MHz)	10	20	20	20
MCS	16 QAM 3/A	MCS 2	MCS 2	MCS 2
MIMO	No	No	No	No
Potencia TX	5 dBm	5 dBm	5 dBm	5 dBm
Ancho de banda esperado	2286 Kbps	1950 Kbps	1950 Kbps	1950 Kbps

Tabla 4.1: *Parámetros de los enlaces inalámbricos*

4.1.3 Configuración NAT

La traducción de direcciones de red (NAT, *Network Adress Translation*) se configura en el router de borde (Negro Urco 4). De esta forma, la dirección pública que se asigna a la red del Napo se traduce en todas las direcciones privadas que conforman la red, pudiendo acceder a cualquiera de las femtoceldas desde fuera y viceversa. En la figura 4.2 se ve un ejemplo de la configuración de uno de los equipos. La primera línea permite salir del router de borde a los paquetes que llegan de la dirección indicada primero (que equivale a la femtocelda o en este caso al equipo final). La segunda línea hace que se acepte el tráfico procedente del servidor o controlador y se haga llegar al equipo final. Análogamente a este ejemplo se han introducido cada una de las direcciones correspondientes a los equipos que simulan las femtoceldas.

```
iptables -t nat -A POSTROUTING -s 10.12.20.12 -j SNAT --to 172.19.4.243

iptables -A FORWARD -s 172.19.4.237 -d 10.12.20.12 -j ACCEPT
```

Figura 4.2: *Ejemplo de configuración del NAT en el router de borde*

El NAT se ha configurado en la ALIX NU4 de manera que se instale cada vez que se inicia el equipo.

4.1.4 Configuración NTP

Network Time Protocol (NTP) es un protocolo para sincronizar los relojes de distintos sistemas en una red. Dado que las femtoceldas se conectan al controlador con certificados que tienen indicado un determinado tiempo de validez, es crucial que todos los equipos estén sincronizados. Además resulta útil para las medidas de retardo que se quieren obtener para verificar el funcionamiento de la red. En la red real el servidor NTP será el controlador NC200, pero en la simulación del laboratorio se tuvo que configurar un equipo para realizar esta función. Para configurar el NTP en primero lugar es necesario instalar en los equipos involucrados el paquete ntp, y posteriormente editar el fichero nat.conf. En él se configura el server al que se va a escuchar. En el caso del equipo que funciona como servidor,este debe escucharse a sí mismo.

4.1.5 Configuración IPSec

Las femtoceldas funcionan estableciendo un túnel IPSec con el controlador, de manera que los paquetes se encapsulan y viajan cifrados para una conexión segura. En este caso, la conexión se realiza en modo túnel y con el protocolo ESP (*Encapsulating Security Payload*)(Figura 4.3). Es preciso que la etiqueta DSCP se duplique fuera del encapsulamiento para que la red de transporte sea capaz de gestionar los paquetes en función del tipo de tráfico. Las femtoceldas ya funcionan así, y en nuestro escenario con ordenadores es necesario replicar lo mismo.

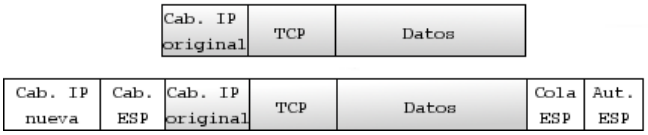

Figura 4.3: *Paquete IP (arriba). Paquete encapsulado en modo tunel ESP (abajo)*

Para generar los túneles IPSec es necesario instalar los paquetes ipsec-tools y racoon de ubuntu. Una vez instalados en los equipos, se deben configurar para conectar los enlaces necesarios. Los ficheros que deben editarse son ipsec-tools.conf, racoon.conf y psk.txt. En el primero se indican las redes entre las que se va a establecer el túnel, y las direcciones en concreto a las que se quiere acceder. En el segundo se establece la política de reconocimiento y creación del túnel y los métodos de codificación. En este caso, se realiza un intercambio de contraseñas para establecer el túnel, y se codifica siguiendo las especificaciones de IP Access. Por último, en psk.txt se declara la contraseña que deben intercambiar los equipos que se van a conectar. Estos tres ficheros deben editarse tanto en el cliente como

en el servidor, aunque no de manera simétrica. El servidor sólo accede a direcciones públicas, y son estas las que le traducen hacia la red privada por medio del NAT.

La figura 4.4 es una captura de Wireshark durante el establecimiento del tunel. Los primeros paquetes ISAKMP realizan el intercambio de contraseñas y a partir de estos, se comienzan a comunicar los dos equipos. Periodicamente, con el tiempo establecido en racoon.conf, el NAT envía un mensaje para que el túnel se mantenga establecido.

Filter: ip.addr==10.12.20.12 && ip.addr==172.19.4.239 Expression... Clear Apply Save

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
53	38.14787100	10.12.20.12	172.19.4.239	ISAKMP	222	Identity Protection (Main Mode)
54	38.14867200	172.19.4.239	10.12.20.12	ISAKMP	162	Identity Protection (Main Mode)
55	38.15465500	10.12.20.12	172.19.4.239	ISAKMP	262	Identity Protection (Main Mode)
56	38.15722200	172.19.4.239	10.12.20.12	ISAKMP	262	Identity Protection (Main Mode)
57	38.18527600	10.12.20.12	172.19.4.239	ISAKMP	114	Identity Protection (Main Mode)
58	38.18591100	172.19.4.239	10.12.20.12	ISAKMP	114	Identity Protection (Main Mode)
59	38.18603600	172.19.4.239	10.12.20.12	ISAKMP	130	Informational
60	38.18993100	10.12.20.12	172.19.4.239	ISAKMP	130	Informational
63	39.14977300	10.12.20.12	172.19.4.239	ISAKMP	306	Quick Mode
64	39.15171500	172.19.4.239	10.12.20.12	ISAKMP	306	Quick Mode
65	39.15351700	10.12.20.12	172.19.4.239	ISAKMP	98	Quick Mode
67	40.14758300	10.12.20.12	172.19.4.239	ESP	158	ESP (SPI=0x0b0a5411)
68	40.14825400	172.19.4.239	10.12.20.12	ESP	158	ESP (SPI=0x0365c12d)
69	41.14762800	10.12.20.12	172.19.4.239	ESP	158	ESP (SPI=0x0b0a5411)
70	41.14825600	172.19.4.239	10.12.20.12	ESP	158	ESP (SPI=0x0365c12d)
71	42.14860000	10.12.20.12	172.19.4.239	ESP	158	ESP (SPI=0x0b0a5411)
72	42.14922200	172.19.4.239	10.12.20.12	ESP	158	ESP (SPI=0x0365c12d)
73	43.14998600	10.12.20.12	172.19.4.239	ESP	158	ESP (SPI=0x0b0a5411)
74	43.15061700	172.19.4.239	10.12.20.12	ESP	158	ESP (SPI=0x0365c12d)
76	43.58515700	172.19.4.239	10.12.20.12	UDPENCAI	60	NAT-keepalive
77	44.15174600	10.12.20.12	172.19.4.239	ESP	158	ESP (SPI=0x0b0a5411)
78	44.15236000	172.19.4.239	10.12.20.12	ESP	158	ESP (SPI=0x0365c12d)
79	45.15354000	10.12.20.12	172.19.4.239	ESP	158	ESP (SPI=0x0b0a5411)

Figura 4.4: *Captura de tráfico encapsulado*

4.1.6 QoS

Dadas las limitaciones de ancho de banda a las que se va a enfrentar el tráfico procedente de las femtoceldas, la red debe encargarse de priorizar los paquetes de voz y señalización frente a los de datos. Las femtoceldas marcan los paquetes con etiquetas DSCP (*Differenciated Services Code Point*) que permiten diferenciar los tipos de tráfico. Por defecto, las femtoceldas que se usarán marcan la voz y la señalización con la etiqueta 0xb8, de máxima prioridad, y los datos con 0x00 (la mínima). La red de transporte debe ser capaz de leer estas etiquetas y direccionar con mayor urgencia la voz y la señalización, almacenando los paquetes de datos que pueda en el buffer, y tirando los que no soporte (el objetivo es tener las menores pérdidas posibles).

Para configurar las colas en las ALIX se ha creado un archivo por cada una de sus interfaces que debe gestionar tráfico. En el caso de las ALIX que conectan con las femtoceldas, se configura la interfaz que sale a la red (corresponde con eth0 como se puede ver en la figura 4.1); y en el router de borde, se configuran eth0 y eth1 que gestionarán el tráfico de bajada. Los parámetros más importantes en las colas HTB son:

- El rate que establece el máximo tráfico de transmisión transmitir. En este caso ese valor ha venido dado por el ancho de banda satelital que ha confirmado Telefonica: 2,6 Mbps de uplink y 3 Mbps de bajada.

- La prioridad asignada a cada tipo de tráfico. Se ha asignado la máxima prioridad al tráfico con etiqueta 0xb8 y menor a la 0x00 como se había establecido.

- Se debe establecer para cada tipo de tráfico el mínimo ancho de banda (rate) que se le garantiza y el máximo al que puede llegar (ceil). La suma de los rate de las prioridades que se utilicen (en este caso sólo dos) debe resultar el máximo tráfico establecido en el parámetro explicado en el primer punto.

- Por último, se establece el tamaño de la cola. Un valor demasiado grande de buffer puede bloquear la transmisión de paquetes, por lo que es necesario usar valores más bajos que no comprometan el funcionamiento de la red.

4.1.7 Scripts de tráfico

Como se ha explicado al comienzo, en las pruebas en el laboratorio del GTR no se ha dispuesto de femtoceldas, por lo que ha sido preciso simularlas. Para enviar tráfico se ha empleado la herramienta D-ITG. Permite disponer los equipos para que uno actúe como servidor y otro como cliente y genera logs que permiten estudiar el resultado de las pruebas, brindando información sobre el throughput recibido, el retardo que ha sufrido la transmisión, su jitter y los paquetes perdidos. El objetivo de las pruebas era analizar el comportamiento de la red al incrementar el número de usuarios, y cómo respondía ante la saturación. Para esto, D-ITG ha resultado muy útil debido a la posibilidad de lanzar scripts, con los que se puede enviar simultáneamente varios flujos de tráfico.

Se han empleado tres tipos de scripts, basados en las características del tráfico de las femtos [39]:

- Envío de voz y señalización, sin datos.

- Envío de datos y señalización, sin voz.

- Envío de voz, datos y señalización.

La voz se envía a una tasa constante de 50 paquetes por segundo, con paquetes de 50 bytes en uplink y 47 en downlink. El incremento por cada nuevo usuario es de estas mismas cantidades para cada uno de ellos. Sin

embargo, el tráfico de datos, aunque tienen un tamaño de paquete específico, se envía a tasas variables estadísticamente como se detalla en el documento [37]. La señalización se ha estimado como un 1% del tráfico total generado, y análogamente al de datos, no se envía de manera constante.

4.2 Instalación en el laboratorio de Telefonica

En Telefonica se ha instalado la red de transporte con la configuración que venía de las pruebas previas y sólo ha sido necesario cambiar las direcciones públicas que procedían de la red de la PUCP a las que se han asignado la proyecto por parte de Telefonica del Perú.

La instalación del controlador NC-200 fue llevada a cabo por IP Access. Se han dado las indicaciones necesarias a TdP y el GTR para que se pueda configurar el acceso de las femtoceldas que formarán la red. El proceso para cada una consiste en añadirlas al controlador con su número de serie, y asignar la dirección correspondiente según el diagrama de red. Una vez configuradas, se reinician y establecen la conexión con el controlador, quedando registradas y listas para usarse. A partir de esta conexión se han realizado pruebas para garantizar la conectividad entre la red de acceso, de tráfico,y el core.

CAPITULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Pruebas en el laboratorio de GTR

En este apartado se van a detallar los resultados de la capacidad de los enlaces de la red de transporte y su respuesta al tráfico con y sin el túnel IPSec, y en la gestión de tráfico. Además, se explican las pruebas realizadas en Telefonica, con la red de acceso y el core ya instalados.

5.1.1 Capacidad de los enlaces

Para analizar la capacidad de los enlaces se ha empleado la herramienta Iperf, que envía tráfico hasta que satura el enlace, informando de la máxima capacidad obtenida. En la tabla 5.1 se muestran los valores de ancho de banda obtenidos antes de establecer el túnel, una vez establecido y con la QoS configurada. En este último caso, se han realizado dos envíos por cada enlace para analizar la respuesta ante el tráfico de máxima prioridad y el de menos.

	UPLINK						DOWNLINK					
			Con QoS						Con QoS			
	Sin IPSec	Con IPSec	Sin IPSec		Con IPSec		Sin IPSec	Con IPSec	Sin IPSec		Con IPSec	
			0xb8	0x00	0xb8	0x00			0xb8	0x00	0xb8	0x00
Santa Clotilde	6190	5980	742	2300	781	2200	4640	5840	839	2660	831	2480
Negro Urco 3	7940	7480	834	2400	827	2300	8110	7350	863	2650	806	2590
Negro Urco 2	8210	7700	836	2300	831	2210	8270	7410	865	2680	807	2580
Tuta Pishco	6860	6490	831	2180	805	2140	8180	7480	863	2710	831	2550

Tabla 5.1: *Resultado Iperf. Capacidad en kbps de los enlaces para IPSec y QoS.*

Dado el encapsulamiento de los paquetes mediante el túnel IPSec, se esperaría una considerable reducción de la capacidad del enlace, aunque por la configuración propia de las femtoceldas esta reducción no es tan grande. En esta simulación observa que la diferencia entre usar o no IPSec es mínima,

confirmando la similitud de este túnel con el establecido por la red de acceso real. La QoS demuestra funcionar como se esperaba al limitar el throughput a los valores del enlace satelital (2,6 Mbps en uplink, y 3 Mbps en downlink).

5.1.2 QoS

Una vez asegurada la capacidad de los enlaces se ha querido analizar la respuesta de la red a la inyección de tráfico etiquetado (voz, datos y señalización). Las primeras pruebas que se realizaron fueron para el caso de máxima carga, con 16 usuarios transmitiendo en cada una de las torres de Negro Urco, y 32 en Tuta Pishco y Santa Clotilde. Igual que en el caso anterior, se ha analizado el comportamiento con y sin IPSec y QoS.

En la figura 5.1 se muestra el throughput de subida (del nodo donde se ha situado el cliente, al servidor). Para cada uno de los enlaces aparece de izquierda a derecha el efecto de aplicar gradualmente el túnel IPSec y la QoS en las ALIX en el tráfico de voz (azul), de señalización (naranja) y de datos (verde). La primera columna de izquierda a derecha en cada enlace muestra el throughput recibido a través del enlace ”limpio”, sin ninguna limitación. La segunda columna representa el throughput a través del túnel IPSec, en la que se puede apreciar la escasa variación que supone en el throughput respecto a la columna anterior. En la tercera y cuarta columna se añade la configuración de las colas HTB que deben restringir el tráfico a los 2,6 Mbps de subida y 3 Mbps de bajada correspondientes al satélite (análogamente a la primera y segunda columnas, una no tiene implementado IPSec y la otra sí). Al haber establecido las prioridades de las distintas etiquetas, se espera que el tráfico de voz y señalización llegue en su totalidad, y los datos se recorten al límite establecido.

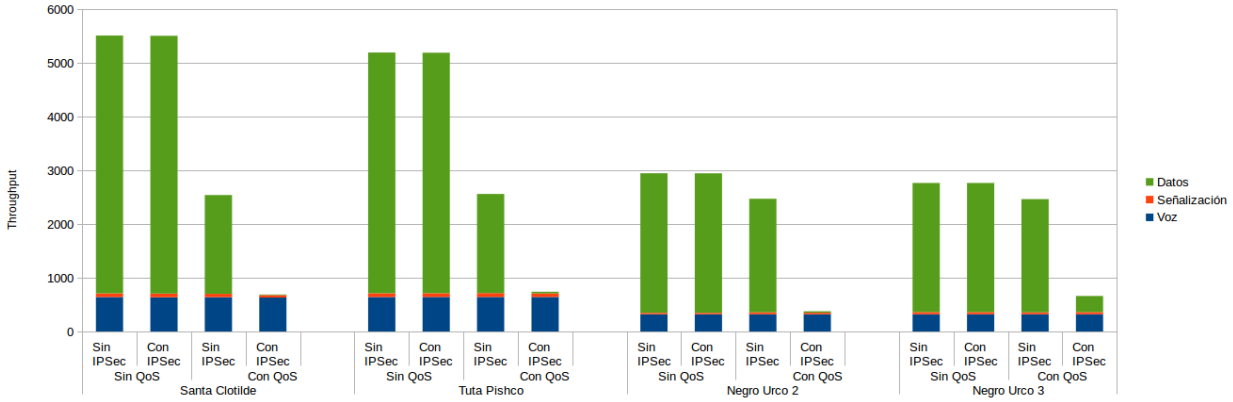

Figura 5.1: *Throughput de subida afectado por QoS e IPSec*

La figura 5.2 muestra los casos de QoS en más detalle. Como se puede observar el uplink está limitado a 2,6 Mbps, transmitiendo sin pérdidas los

640 kbps de voz y la señalización. Las variaciones en este tipo de tráfico no se deben a pérdidas, si no a que como se indicó anteriormente, el tráfico de señalización se ha estimado como el 1% del tráfico total. Los datos sin embargo sí deben recortarse, límitandose a la capacidad libre que queda de los 2,6 Mbps. Como se aprecia en la figura, los resultados sin IPSec (columna izquierda de cada enlace) cumplen el resultado esperado. No obstante, los casos en los que se implementan la QoS y el túnel IPSec simultáneamente no muestran un funcionamiento correcto. Los errores en el tráfico de datos para este caso se asocian a dos parámetros. El primero es el tamaño de paquete. Se han considerado paquetes de un tamaño uniforme y grande (1372 bytes); cuando en realidad es más realista dividirlo en tres tamaños de paquetes (pequeños, medianos y grandes). De esta forma se podría apreciar cómo los paquetes pequeños llegarían mientras que los grandes serían los paquetes perdidos en mayor cantidad. El segundo es el tamaño de las colas en las ALIX. La solución sería hacer más grandes las colas para que no se perdieran paquetes. Sin embargo esto introduciría un jitter y retardo que empeoraría la calidad de la conexión, perjudicando a todos los tipos de paquete al saturar los routers e impidiendo el establecimiento de llamadas.

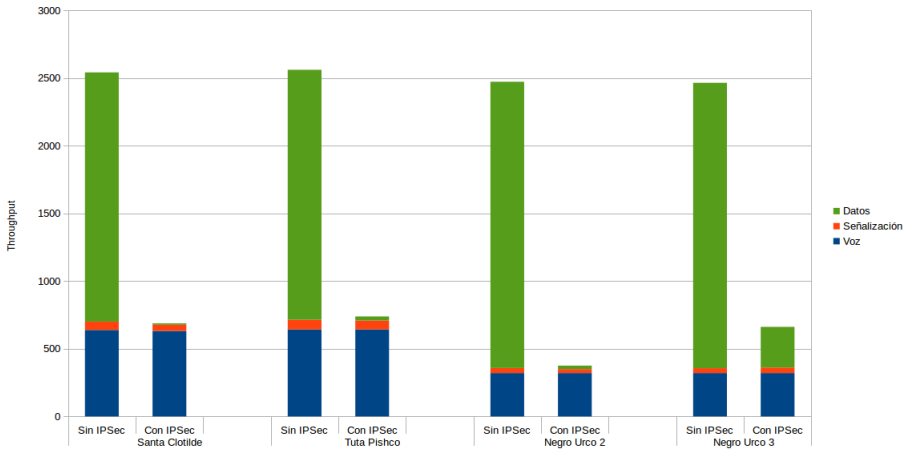

Figura 5.2: *Comparación del throughput de subida limitado por la QoS, sin y con IPSec*

En las figuras 5.3 y 5.4 se muestran los mismos resultados comentados previamente para los enlaces en bajada. Los resultados vuelven a fallar en las pruebas que combinan IPSec y QoS, pero las otras demuestran el correcto funcionamiento del túnel y de las colas HTB.

Además de estas pruebas para el caso peor de cada enlace, se han realizado pruebas inyectando tráfico desde 2 a 16 ó 32 usuarios (dependiendo del enlace) para analizar el comportamiento de la red. Estas se han llevado a cabo tanto con QoS como con IPSec. En la figura 5.5 se muestra la evolución del throughput de los enlaces en subida con QoS y sin túnel IPSec. Se aprecia

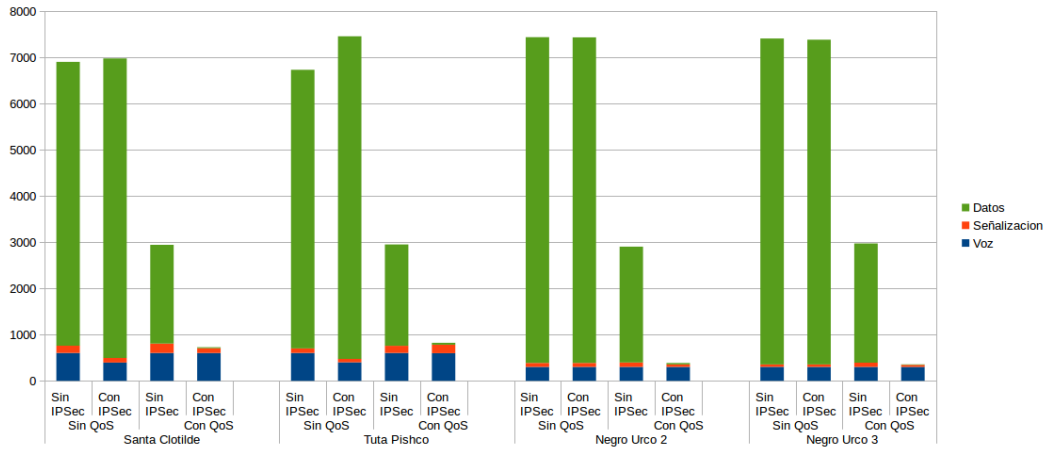

Figura 5.3: *Throughput de bajada afectado por QoS e IPSec*

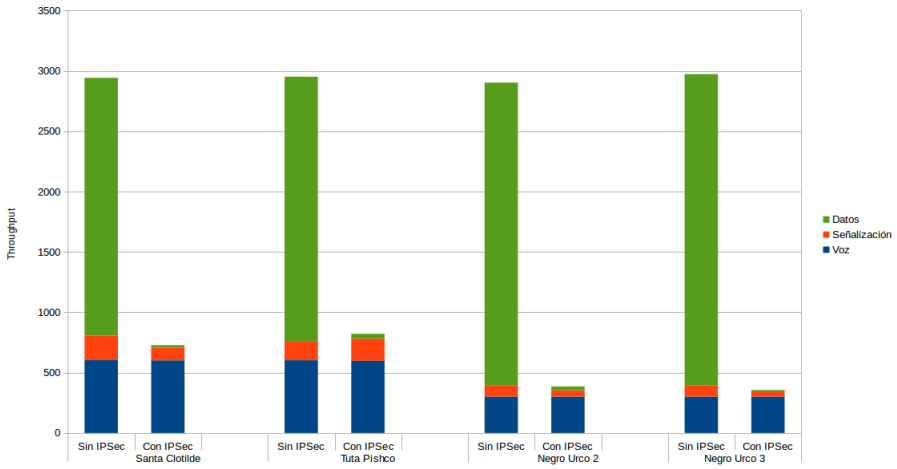

Figura 5.4: *Comparación del throughput de bajada limitado por la QoS, sin y con IPSec*

que la voz y la señalización llegan siempre sin pérdidas, mientras que los datos saturan al alcanzar el máximo del enlace establecido en la QoS.

5.2 Pruebas en el laboratorio de Telefonica

El principal objetivo de las pruebas en las instalaciones de Telefonica ha sido confirmar la conectividad entre la red de acceso, la de transporte y el core. La primera prueba en llevarse a cabo fue una llamada. En la figura 5.6 se aprecia el tráfico de paquetes de voz y señalización que esta genera. Como se observa, se mantiene constante, como se espera de una llamada de voz en la que casi no se han producido silencios. Los picos representan los envíos de

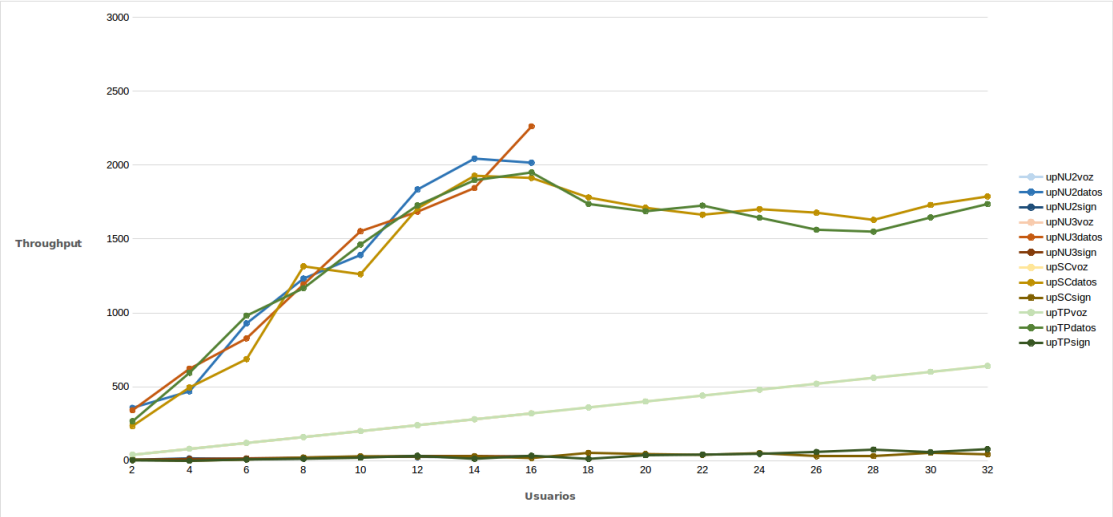

Figura 5.5: *Evolución del throughput de subida al incrementar los usuarios, con QoS*

señalización, que se ven más acentuados en el momento de establecimiento y desconexión de la llamada.

Una vez comprobada la viabilidad de la llamada, se intentó navegar por internet. Se visualizó contenido de youtube, dando lugar al tráfico mostrado en la figura 5.7. Como se ve el tráfico es mucho menos estable, y el throughput que requiere es mayor. La capacidad de la red es más que suficiente para soportar el tráfico de un usuario, por lo que el vídeo se veía sin cortes ni pixelado.

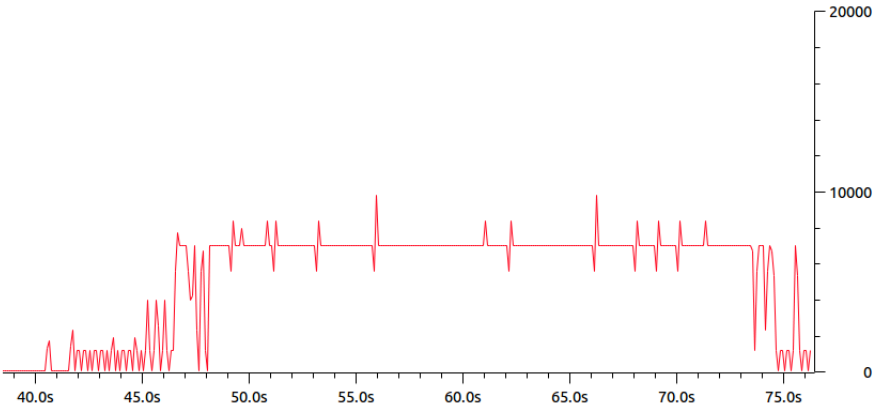

Figura 5.6: *Throughput de una llamada en función del tiempo*

La última prueba que se ha realizado ha sido la conexión de dos teléfonos a la femtocelda: uno recibía una llamada mientras el otro visualizaba contenido de youtube. La figura 5.8 muestra el throughput que emplea este tráfico. La línea roja representa la llamada, más uniforme y con menos throughput. La

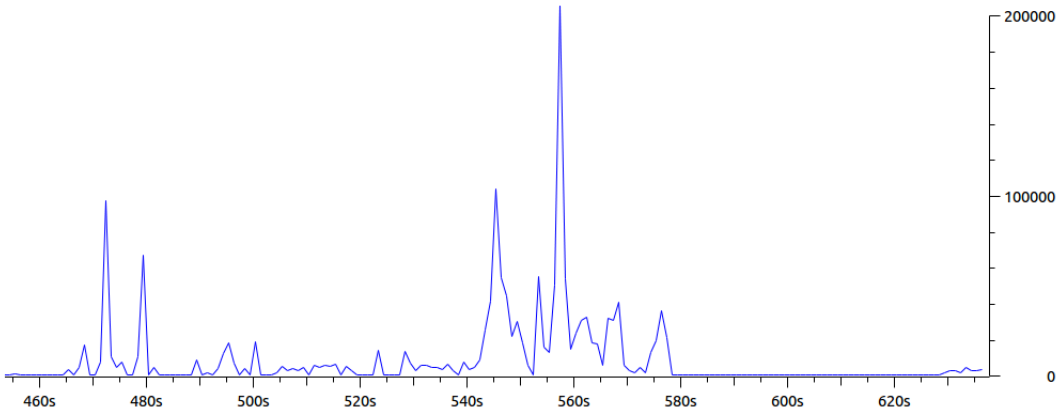

Figura 5.7: *Throughput de contenido de youtube*

azul es el tráfico de internet, mucho más variable y de más capacidad.

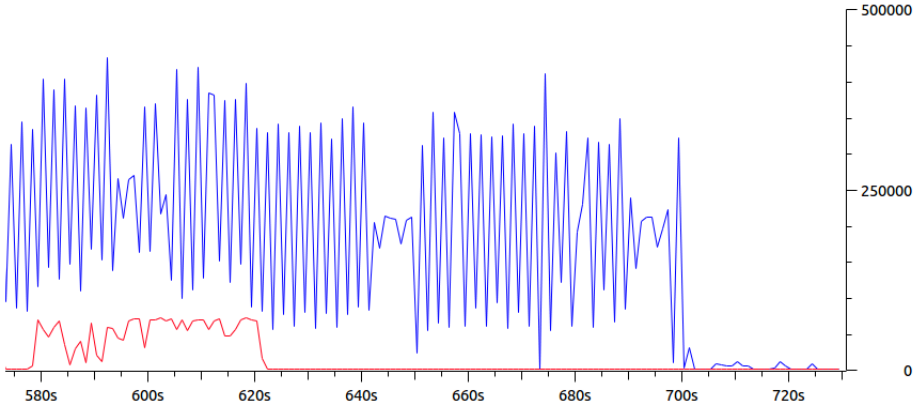

Figura 5.8: *Throughput de contenido de youtube y llamada simultáneos*

Con esto se ha comprobado la conectividad y se han verificado las similitudes de la maqueta realizada en el GTR con la de Telefonica. El túnel IPSec se encapsula igual (ESP) y el tráfico es diferenciado como los scripts empleados ppara simular las femtoceldas. Por falta de tiempo no se han podido realizar más pruebas en Telefonica. Las siguientes etapas del TUCAN3G realizarán pruebas con más terminales distribuidos en los distintos enlaces y realizarán la instalación en terreno.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

Finalmente el proyecto ha cumplido los objetivos planteados. Se realizó el análisis del estado del arte y de las etapas previas del TUCAN3G, y se a partir de esto se ha instalado la maqueta de la red del Napo. Además se ha simulado la red de acceso de las femtoceldas lo más fielmente posible y se ha comprobado el correcto funcionamiento de la red de transporte en respuesta al tráfico diferenciado que habrá en la red real. Las conclusiones a las que he llegado a lo largo de este trabajo son:

- El despliegue de una red de transporte heterogénea resulta una opción muy aconsejable para zonas rurales aisladas. Aunque las pruebas más definitivas se realizarán en terreno, con las distancias reales, incluyendo el enlace satelital y con todas las femtoceldas comunicándose simultáneamente, los resultados de este trabajo muestran que la red se comporta de acuerdo a lo esperado.

- Se ha comprobado que los enlaces proporcionan una capacidad suficiente para establecer llamadas y gestionar tráfico de datos. Aunque este último ahora es muy reducido, en caso de crecer la demanda y funcionar correctamente el piloto Telefonica podría ampliar el ancho de banda satelital para ofrecer mayor capacidad.

- Se ha propuesto un mecanismo para simular el tráfico de las femtoceldas, de manera que no sea necesario disponer de estos equipos para realizar simulaciones de laboratorio. Se ha demostrado que establecer o no el túnel IPSec no afecta demasiado a las características de la red, haciendo además que sea una conexión segura y fiable.

- Dadas las anteriormente mencionadas limitaciones de ancho de banda, es imprescindible gestionar la QoS de la red para garantizar el throughput necesario para la voz y señalización: el primero porque es el principal servicio que se quiere prestar, siendo el más relevante para el usuario; y el segundo porque sin esta comunicación no sería posible establecer los enlaces.

Como se ha detallado, se ha demostrado el correcto funcionamiento de la red de transporte confirmado los resultados esperados y se ha introducido esta nueva simulación de la red de acceso. Estos mismos equipos son los que se enviarán al Napo para instalarse en terreno, y tras las pruebas en Telefónica, no se esperan grandes cambios en su respuesta al tráfico. Ya fuera de tiempo para este TFG, mi estancia en Perú se alarga un mes más para participar en esta instalación y verificación del piloto.

BIBLIOGRAFIA

[1] INGENIERÍA SIN FRONTERAS(2005). Tecnologías de la Información y la Comunicación para el Desarrollo: Retos y Perspectivas https://www.isf.es/adjuntos/cas/pdf/INFORME_1_ISF.pdf

[2] BROADBAND COMMISSION FOR DIGITAL DEVELOPMENT(2014). Means of Transformation: Harnessing Broadband for the Post-2015 Development Agenda http://www.broadbandcommission.org/publications/Pages/Task-Force-Post-2015.aspx

[3] Evelio Martínez Martínez, Ignacio Ascencio López, Arturo Serrano Santoyo. Entendiendo y definiendo la brecha digital http://www.labrechadigital.org/labrecha/Articulos/understanding.html

[4] Proyecto Tucan3G. Wireless technologies for isolated rural communities in developing countries based on cellular 3G femtocell deployments. http://www.ict-tucan3g.eu/

[5] EHAS (Enlace Hispanoamericano de Salud) http://www.ehas.org/que-hacemos/proyectos-de-cooperacion/peru/

[6] MINTRA (Ministerio del Trabajo y Promoción del Empleo). Diagnóstico socioeconómico y laboral de la región de Loreto.http://www.mintra.gob.pe/archivos/file/estadisticas/peel/osel/2013/Loreto/estudios/estudio_012013_OSEL_Loreto.pdf

[7] TUCAN3G. D61: Situation report of the deployment area, sensitization results and state of transport networks. http://www.ict-tucan3g.eu/index.php?option=com_spcom&Itemid=88

[8] Frost and Sullivan. Impacto social de la telefonía móvil en América Latina http://cet.la/blog/course/el-impacto-social-de-la-telefonia-movil-en-america-latina/

[9] INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). Hogares con al menos un miembro que tiene teléfono

celular, por años, según ámbitos geográficos http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/tecnologias-de-la-informacion-y-telecomunicaciones/

[10] OSIPTEL (Organismo Supervisor de Inversión Privada de Telecomunicaciones). Acceso universal y telecomunicaciones rurales en el Perú. http://www.fitel.gob.pe/archivos/FI509c3a1faa93c.pdf

[11] Iperf https://iperf.fr/

[12] Wireshark https://wiki.wireshark.org/FrontPage

[13] A. Botta, A.Dainotti, S. Avallone, A. Pescapé. "D-ITG 2.8.1 Manual". http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/manual/

[14] IEEE 802.11-1999 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Computer Society, September 1999.

[15] IEEE 802.11b-1999 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 5 GHz Band, Computer Society,1999.

[16] TUCAN3G. D51: Technical requirements and evaluation of WiLD, WIMAX and VSAT for backhauling rural femtocells networks. http://www.ict-tucan3g.eu/documents/deliverables/TUCAN3G_D51URJCa.pdf

[17] IEEE 802.11g-2003 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE Computer Society, 2003. IEEE 802.16 Standard: Local and Metropolitan Area Networks-Part 16, IEEE-SA, 2004.

[18] IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2012 revision.

[19] Severine Catreux, Vinko Erceg, David Gesbert, Robert W. Heath, Jr.Adaptive Modulation and MIMO Codingfor Broadband Wireless Data Networks. IEEE Communications Magazine, June 2002

[20] Nv2 Mikrotik http://wiki.mikrotik.com/wiki/Nv2_spanish

[21] AirMAX Ubiquiti https://www.ubnt.com/broadband/

[22] P. Bhagwat et al., "Turning 802.11 Inside-Out", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 34, n. 1, January 2004

[23] Sonesh Surana, Rabin Patra, Sergiu Nedevschi and Eric Brewer, "Deploying a Rural Wireless Telemedicine System: Experiences in Sustainability", Computer, vol. 41, n. 6, pp. 48-56, 2008.

[24] A.R. Gallón, P.J Ludeña González, A. Martínez Fernández (editores) "Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para zonas rurales: Aplicación a la atención de salud en países de desarrollo". Mayo 2013.

[25] Simo Reigadas, Javier, et al., "Modeling and optimizing IEEE 802.11 DCF for long-distance links ", IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, n. 6, June 2010.

[26] IEEE 802.16 Standard: "Local and Metropolitan Area Networks-Part 16", IEEE-SA, 2004.

[27] IEEE 802.16 Standard:"Local and Metropolitan Area Networks-Part 16 ", IEEE-SA, 2009 revision.

[28] G. Cayla et al. 2005. WiMAX An Efficient Tool To Bridge The Digital Divide, (Online) WiMAX Forum. http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/tecnologias-de-la-informacion-y-telecomunicaciones/

[29] Digital Video Broadcasting (DVB);Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2)

[30] K. w. Matthee, G. Mweemba, A. V. Pais, G. van Starn, M. Rijken. "Bringing Internet connectivity to rural Zambia using a collaborative approach". http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4937391

[31] Ying Su, Ismael Caballero. "Deployment of Broadband Wireless Access for E-health in Chinese Rural Areas". http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5588948

[32] D.Chambers.Think Small Cell."What is a rural small cell?" http://www.thinksmallcell.com/Rural/what-is-a-rural-small-cell.html

[33] TUCAN3G. D41: UMTS/HSPA network dimensioning http://www.ict-tucan3g.eu/documents/deliverables/TUCAN3G_D41UPCai.pdf

[34] Small Cell Forum. "Extending rural and remote coverage using small cells" 2014 http://scf.io/en/documents/047_Extending_rural_and_remote_coverage_using_small_cells.php/Extending

[35] E. Municio Hernández, "Redes de transporte heterogéneas para femtoceldas 3G rurales en países en desarrollo". MSc Thesis 2014.

[36] IP Access http://www.ipaccess.com/

[37] TUCAN3G. D52: Heterogeneous transport network testbed deployed and validated in laboratory http://www.ict-tucan3g.eu/documents/deliverables/TROPIC_D52URJCa.pdf

[38] F.J. Simó Reigadas, E. Municio, L. F. Solórzano, E. Morgado, E. M. Castro y A. Martínez. "Sharing low-cost wireless infrastructures with telecommunications operators for backhauling 3G services in deprived rural areas" Computer Networks COMNET International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2015

[39] Esteban Municio Hernández, "Femtocell Traffic Caracterization". ICT-601102 STP TUCAN3G - WP5 - 5A3.5