



Universidad
Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Telemática

Ingeniería de Telecomunicación

PROYECTO FIN DE CARRERA

Integración de Radio Mobile y NS-3 para la
planificación de redes rurales híbridas
WiMAX+WiFi.

Autor: Patxi Azpiroz De Pedro - 100065551

Director: Francisco Javier Simó Reigadas

Tutor: Simon Pickin

Leganés, 2 de julio de 2010

TÍTULO: *Integración de Radio Mobile y NS-3 para la planificación de redes rurales híbridas WiMAX+WiFi.*

AUTOR: *Patri Azpiroz De Pedro*

DIRECTOR: *Francisco Javier Simó Reigadas*

TUTOR: *Simon Pickin*

EL TRIBUNAL

PRESIDENTA: Mari Carmen Fernández Panadero

SECRETARIO Isaac Seoane Pujol

VOCAL Carlos Figuera Pozuelo

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 2 de julio de 2010 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

Presidente

Secretario

Vocal

Agradecimientos

Quiero agradecer antes que nada a Javier Simó y Simon Pickin, por el tiempo y esfuerzo que me habéis ofrecido.

A toda la familia EHAS, por su gran trabajo con pequeños recursos y sus fines ejemplares. En especial a Carlos Rey (por todo) y Nacho Foche (frikadas varias).

Al departamento de TSC de la URJC, en especial a Oscar Barquero (soporte L^AT_EX).

A todos los compañeros de carrera durante este segundo ciclo (¡esta ha sido una batalla ganada entre todos!).

A Albentia Systems, en especial a Silvia e Iratxo, por la paciencia en este prolongado remate.

A Marta, por haber estado a mi lado durante toda la carrera.

Eta nola ez, nire eskerrik beroenak etxekoei, egiten dudan oron laguntzeagatik (Atta, Ama, Antton, Txomin; Attonak eta Amonak, ...).

Patxi.

Ver amanecer no tiene precio, además es gratis.

Resumen

Este trabajo se presenta como proyecto fin de carrera de Ingeniería de Telecomunicación cuyo objetivo es crear un herramienta software libre o gratuita que facilite la planificación de redes rurales en países en vías de desarrollo.

La herramienta tiene que trabajar con modelos de terreno irregular, debido a la naturaleza de enlaces de largas distancias, tanto en la selva como en la sierra, además de simular redes de comunicaciones inalámbricas de banda ancha híbridas, basadas en tecnologías WiFi y WiMAX.

La arquitectura de la aplicación, parte del simulador de coberturas en radio-frecuencia **Radio Mobile** que es capaz de generar un reporte de salida con información de la red. Este resumen de la red se analiza mediante un software adaptador, que genera un script (fichero texto) que se lee e interpreta en el simulador de red de eventos discretos **NS-3** para construir la red. Una vez acabada la simulación se procesan las trazas de tráfico para obtener los resultados de la medición del comportamiento de la red.

De este modo se ofrece a los equipos de despliegue una herramienta simple, versátil y sistematizada de estimar las prestaciones en redes de características mencionadas.

Abstract

This work is a final degree project in Telecommunication Engineering whose aim is to build an open source or free tool to facilitate rural network planning in developing countries.

Due to the nature of long distance links, the toolkit must work with irregular terrain model, as such, be suitable for use in varied terrains such as jungle as well as mountains. It's aim is to simulate rural networks using hybrid broadband wireless communications based on WiFi and WiMAX technologies.

The first stage of the application is based on a radio-frequency simulator called **Radio Mobile** which generates a network report. This output is analyzed by a adapter software which generates a simulation script of the network for **NS-3**, a discrete event network simulator. Once executed, the traffic traces are processed in order to obtain results that measure the behaviour of the network.

In this way, a simple, versatile, and systematic free tool exists, for any telecommunications group to use.

Índice general

1. Motivación	1
1.1. Introducción	1
1.2. EHAS - Enlace Hispano Americano de Salud	2
1.2.1. Estructura del Sistemas de Salud	2
1.2.2. Problemas del Sistema de Salud	3
1.2.3. Evolución Tecnológica	4
1.3. Necesidad de una herramienta de planificación	13
2. Introducción	15
2.1. Objetivos	15
2.2. WiFi - IEEE802.11	16
2.2.1. Arquitectura de Red	16
2.2.2. PHY - Nivel Físico en IEEE802.11	17
2.2.3. MAC - Control de acceso al medio en IEEE802.11	19
2.2.4. WiFi para largo alcance	23
2.3. WiMAX - IEEE802.16	25
2.3.1. WiMAX - PHY	26
2.3.2. WiMAX - MAC	26
2.3.3. Soporte a la capa PHY dentro de la capa MAC	26
2.3.4. Inicialización de un nodo de la red	29
2.3.5. Mecanismos de solicitud y gestión de ancho de banda	30
2.3.6. Provisión de la calidad de servicio	30

2.3.7.	Flujos de Servicio	31
2.3.8.	Servicio de planificación	32
3.	Arquitectura de la herramienta	35
3.1.	Metodología	35
3.2.	Diagrama de bloques	36
3.2.1.	Simulador de radio	37
3.2.2.	Datos de salida	38
3.2.3.	Lector de datos	38
3.2.4.	Generación del script del simulador de red	38
3.2.5.	Capa superior del simulador de red	38
3.2.6.	Simulador de red	38
3.2.7.	Resultados	38
3.2.8.	Realimentación	39
4.	Evaluación de posibles componentes de la arquitectura	41
4.1.	Simuladores de enlaces de radio	41
4.1.1.	Introducción	41
4.1.2.	Datos de entrada	42
4.1.3.	Operaciones	44
4.1.4.	Archivos de salida	50
4.1.5.	Conclusiones	50
4.2.	Simuladores de red	51
4.2.1.	Introducción	51
4.2.2.	Requisitos	51
4.2.3.	Evaluación de simuladores	55
4.2.4.	GloMoSim	55
4.2.5.	J-Sim	55
4.2.6.	GTNetS	56
4.2.7.	JIST/SWANS	56
4.2.8.	SSFNet	56
4.2.9.	NCTU _{ns}	56

4.2.10. OMNeT++	62
4.2.11. ns-2	66
4.2.12. ns-3	73
4.2.13. Conclusiones	77
5. Solución adoptada	79
5.1. Introducción	79
5.2. Planificador de radioenlaces y de coberturas de radio	80
5.2.1. Estructura de la información del reporte de Radio Mobile	81
5.2.2. Información necesaria para la generación automática de redes	83
5.2.3. Protocolo de Nomenclatura de sistemas	85
5.3. <i>Python Adapter</i>	85
5.3.1. Estructura del fichero net-info	86
5.4. <i>Wireless-Planning</i>	88
5.4.1. Introducción	88
5.4.2. Breve introducción al proyecto ns-3	88
5.4.3. Estructura del código de ns-3	89
5.4.4. El script principal de ns-3	89
5.4.5. Arquitectura	90
6. Validación de la herramienta	97
6.1. Introducción	97
6.2. Herramienta de Planificación	97
6.3. Simulador de Radio	98
6.4. <i>Python Adapter</i>	98
6.5. <i>Wireless-Planning</i>	99
6.6. Resultados obtenidos de ns-3	99
6.6.1. Caudal en WiFi	100
6.6.2. Caudal en WiMAX	103
6.6.3. Redes Híbridas WiFi+WiMAX	103
7. Conclusiones	109
7.1. Futuras Lineas de Trabajo	112

7.1.1. Mejoras Concretas	112
7.1.2. Mantenimiento	113
7.1.3. Mejoras Generales	113
A. Presupuesto	115
B. Glosario de Términos	117

Lista de Figuras

2.1. Esquema temporal de funcionamiento en el nivel MAC.	20
2.2. Trama TDD.	27
2.3. Funcionamiento de la QoS dentro de las estaciones.	31
3.1. Arquitectura de la herramienta de planificación.	37
4.1. Mapa de cobertura generado con SPLAT.	45
4.2. Mapa de cobertura generado con Radio Mobile.	46
4.3. Perfil del terreno con Radio Mobile.	47
4.4. Perfil del terreno con SPLAT.	49
4.5. Modelo de canal con NCTUns.	58
4.6. Obstáculos en NCTUns.	59
4.7. Arquitectura NCTUns.	60
4.8. Ejemplo del entrono gráfico del NCTUns.	61
4.9. Arquitectura modular del OMNET++.	63
4.10. GUI de OMNET++.	65
4.11. Módulo MIRACLE.	70
4.12. Módulo Mobile Node.	70
4.13. GUI del Nam.	72
4.14. GUI del nsbench.	72
5.1. Arquitectura de la solución adoptada para el planificador de red.	80
5.2. Ejemplo de resultado gráfico, throughput.	92

5.3. Ejemplo de resultado gráfico, retardo medio.	93
5.4. Ejemplo de resultado gráfico, paquetes no recibidos.	94
5.5. Ejemplo de resultado gráfico, histograma del retardo.	95
6.1. Diagrama de red de la parte noreste de la red Alis de Cusco.	100
6.2. Diagrama de red de toda la red Alis de Cusco.	106
6.3. Throughput en función de la distancia en 802.11a y 802.11b.	107

Lista de Tablas

2.1. Máxima potencia transmisible en 2.4GHz por regiones.	23
6.1. Throughput en función de la distancia en 802.11a y 802.11b.	101
6.2. Throughput en función del Access Class.	102
6.3. Throughput en saturación en función del Access Class.	102
6.4. Throughput en saturación en función del Access Class.	103
6.5. Parámetros de la PHY de OFDM.	104
6.6. Throughput teórico alcanzable en función de la modulación en 802.16 [26].	105
6.7. Troughput en función de la modulación en 802.16.	105
A.1. <i>Presupuesto del Proyecto</i>	115
A.2. <i>Fases del Proyecto</i>	116
A.3. <i>Equipo</i>	116
A.4. <i>Resumen de Costes</i>	116

Capítulo 1

Motivación

1.1. Introducción

La tercera parte de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de Naciones Unidas están relacionados directamente con la salud: reducir en dos terceras partes la mortalidad de los niños menores de 5 años y la mortalidad materna en tres cuartas partes; detener y comenzar a reducir la propagación de VIH/SIDA y la incidencia del paludismo y otras enfermedades graves.

Por otra parte, se avanza hacia sociedades estructuradas sobre la información y el conocimiento, donde las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) juegan un papel fundamental en el desarrollo, y pueden ser decisivas para mejorar de forma eficaz las condiciones de vida de amplios sectores de población marginada.

Conscientes de esta situación, un grupo de estudiantes del Grupo de Bioingeniería y Telemedicina (GBT) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la ONGD Ingeniería Sin Fronteras empezaron en 1997 investigaciones para el diseño de sistemas y servicios de comunicación apropiados a las necesidades del personal sanitario rural de los países de América Latina. A raíz de estos trabajos se diseña y ejecuta el Programa **Enlace Hispano Americano de Salud** (EHAS) [18], que desde la telemedicina (aplicación de la telecomunicación y la informática a la salud) pretende contribuir a la mejora de los sistemas públicos de asistencia sanitaria en las zonas rurales de América Latina.

1.2. EHAS - Enlace Hispano Americano de Salud

Después de un periodo inicial de investigación realizado en Madrid por el grupo GBT-UPM se obtiene una importante conclusión: el acceso a Internet a través de la tecnología radio VHF/HF en zonas rurales aisladas de países en desarrollo es viable tanto tecnológicamente como económicamente. Con el objetivo de implementar un primer proyecto piloto en Perú, dos instituciones locales de Lima se unen al Programa EHAS: la Facultad de Telecomunicaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), actuando como contraparte tecnológica, y la Facultad de Medicina de la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), actuando como contraparte médica. Este equipo multidisciplinario comienza a trabajar en el desarrollo de dos líneas principales de acción: la tecnología EHAS y los servicios EHAS.

Esto es lo que analizó el programa EHAS y se creó con el fin de promover el uso apropiado de las nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para mejorar los procesos de salud en zonas rurales aisladas de países en desarrollo.

A día de hoy EHAS, siendo una fundación mayor de edad (más de 5 años de trabajo lo avalan) sigue entregado en esa lucha de la investigación de las TIC para el Desarrollo Humano. Se mencionan como ejemplo nuevos servicios de telemedicina: la teleestetoscopia digital, prototipos en proceso de pruebas y la telemicroscopia digital, bajo investigación.

Cada servicio nuevo que se añade al programa de salud, mayor es el ancho de banda requerido, lo que ha llevado que las redes HF/VHF hayan evolucionado poco a poco a redes WiFi/WiMAX.

1.2.1. Estructura del Sistemas de Salud

Una vez entendida la necesidad y la motivación principal, se introduce brevemente el contexto rural del sistema de salud.

De forma genérica, los establecimientos de atención primaria en los países en América Latina donde EHAS actúa pueden agruparse en dos categorías: Centros de Salud (también llamados policlínicos) y Puestos de Salud (o consultorios).

Los Puestos de Salud (PS)

son los establecimientos de menor jerarquía dentro del sistema público de atención primaria y constituyen la puerta de acceso al sistema para la población rural. Suelen estar situados en poblaciones de no más de mil habitantes, sin línea telefónica y mal dotadas de infraestructura de

carreteras. Varios PS dependen de un único Centro de Salud, conformando lo que se denomina micro-red de salud, que se convierte en la unidad básica de atención primaria. Las micro-redes están dirigidas por un médico que es el responsable del Centro de Salud y que coordina las acciones de los PS que dependen de él. La mayoría de estos PS están dirigidos por técnicos de enfermería, enfermeras o a lo sumo un médico recién graduado. En definitiva se trata de personal con escasa formación y que necesita comunicación con su médico de referencia para realizar consultas, enviar informes de vigilancia epidemiológica, abastecerse de medicamentos e informar sobre la existencia de brotes epidémicos agudos, emergencias médicas o desastres naturales.

Los Centros de Salud (CS)

son establecimientos de mayor jerarquía que los PS, situados en capitales de provincia o distrito, donde suele llegar la línea telefónica. Un CS es centro de referencia de varios PS. Está siempre dirigido por médicos y posee cierta infraestructura y equipamiento para realizar algunas pruebas diagnósticas, además de permitir a veces hospitalización. Son el lugar desde el que se coordinan las actividades de los PS asociados.

Normalmente, y debido a la falta de un sistema de comunicación, el intercambio de información entre estos establecimientos se realiza por desplazamiento del personal de salud, ya sea caminando o en vehículo terrestre o fluvial. Estos desplazamientos pueden llevar desde horas hasta días, como sería el caso de aquellas zonas selváticas donde el transporte fluvial, caro e inaccesible para la gran mayoría de la población, resulta ser el único medio de comunicación.

1.2.2. Problemas del Sistema de Salud

El programa EHAS ha desarrollado una metodología y varias herramientas para la detección de necesidades de comunicación y acceso a información del personal de salud rural. Así, en los estudios realizados en los países de actuación los resultados principales muestran que:

- Las 3/4 partes del personal sanitario rural tiene sensación de aislamiento profesional.
- La mayoría de los establecimientos de salud rural están dirigidos por técnicos de enfermería, personal con escasa formación que necesita comunicación continua con su médico de referencia para hacer consultas clínicas.

- Entre 1 y 2 días a la semana quedan desatendidos los establecimientos rurales por viajes de coordinación del personal asistencial.
- La media de tiempo necesaria para que un técnico viaje hasta su centro de referencia (lugar donde se encuentra a su médico responsable) es muy alta (en la provincia de Alto Amazonas, Loreto, Perú, es de 10 horas ida y 10 horas de vuelta).
- Hay un alto gasto por el envío de información epidemiológica y administrativa (los puestos de salud envían alrededor de 100 hojas mensuales a su centro de salud de referencia, y los centros de salud unas 300 a la dirección provincial).
- El personal sanitario es muy joven (alrededor de 32 años) y existe una alta rotación (no permanecen más de 2 años en el mismo establecimiento).
- El sistema de emergencias y la coordinación para el traslado de pacientes graves es muy ineficiente.
- No es posible realizar consultas sobre dudas diagnósticas.
- La mayoría de los establecimientos de salud rurales no tienen posibilidad de instalar teléfono, ni está en los planes a medio plazo de las compañías telefónicas.
- No hay acceso a electricidad en la mayoría de las poblaciones rurales.
- Estos problemas hacen pertinente una intervención centrada en el refuerzo de las capacidades del personal gerencial y de salud, así como en la dotación de sistemas de telecomunicación que garanticen la coordinación y el intercambio permanente de información.

Partiendo de las limitaciones económicas de los Sistemas Públicos de Salud y las condiciones ambientales propias de las zonas rurales aisladas, se hace necesario emplear tecnología de telecomunicación apropiada, robusta y sostenible, pero de bajo consumo, bajo coste y bajo mantenimiento, que contribuya a reducir las brechas formativas del personal de salud rural y a potenciar la coordinación con los niveles superiores.

1.2.3. Evolución Tecnológica

En esta sección se hace un breve repaso sobre la evolución tecnológica del programa EHAS así como una pequeña introducción al término de tecnologías apropiadas.

Tecnologías Apropriadas

Se considera que una tecnología es apropiada cuando tiene efectos beneficiosos sobre las personas y el medio ambiente. Aunque el tema es objeto de intenso debate, hay acuerdo bastante amplio sobre las principales características que una tecnología debe tener para ser social y ambientalmente apropiada:

- No causar daño previsible a las personas ni daño innecesario a las restantes formas de vida (animales y plantas).
- No comprometer de modo irrecuperable el patrimonio natural de las futuras generaciones. Mejorar las condiciones básicas de vida de todas las personas, independientemente de su poder adquisitivo.
- La inversión de los gobiernos en tecnologías apropiadas debe priorizar de modo absoluto la satisfacción de las necesidades humanas básicas de alimentación, vestimenta, vivienda, salud, educación, seguridad personal, participación social, trabajo y transporte.

Los conceptos tecnologías apropiadas y tecnologías de punta son completamente diferentes. Las tecnologías de punta, término publicitario que enfatiza la innovación, son usualmente tecnologías complejas que hacen uso de muchas otras tecnologías más simples. Las tecnologías apropiadas frecuentemente, aunque no siempre, usan saberes propios de la cultura (generalmente artesanales) y materias primas fácilmente obtenibles en el ambiente natural donde se aplican.

Intentar aplicar la filosofía de tecnología apropiadas en el mundo de las telecomunicaciones no es nada trivial. Desde el momento que se necesitan dispositivos electrónicos o de microelectrónica para llevar a cabo esas comunicaciones a distancia el término puede derivarse a tecnologías más apropiadas o tecnologías intermedias como lo señalan algunos autores. Los diseños de equipos para países en vías de desarrollo, no puede ser los mismo que para países desarrollados, donde encontrar componentes de repuesto no significa mayor esfuerzo. En sitios que si lo significa, los diseños deben ser mucho más robustos y sostenibles.

Ejemplos de tecnologías apropiadas: La bioconstrucción o construcción de viviendas con materiales locales, como el adobe, con diseños sencillos pero que garanticen la estabilidad de la construcción, la higiene de las instalaciones, la protección contra las variaciones normales del clima y un bajo costo de mantenimiento, actividad tecnológica frecuentemente descuidada.

La letrina abonera seca es una manera higiénica de disponer de los excrementos humanos y transformarlos en abono sin uso de agua. Es una tecnología apropiada para ambientes donde el agua es escasa o no se puede depurar su carga orgánica con facilidad y seguridad.

Un ejemplo de tecnología apropiada en telecomunicaciones podría ser el uso de ondas cortas para la transmisión de datos mediante tarjetas de sonido en vez de módems [42]. Algunas características del canal HF (ruido, bajo ancho de banda, desvanecimientos, etc.) hacen difícil trabajar con él, por lo que los módems de HF hasta el momento habían sido extraordinariamente caros, o muy lentos (típicamente de 100 a 300 bps para los de radioaficionados). Para aprovechar el escaso espectro disponible fue necesario trabajar en profundidad en la modulación a utilizar. Se desarrolló un módem software para tarjetas de sonido que utiliza modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) -la misma usada en telefonía de última generación- consiguiéndose alcanzar velocidades alrededor de los 2.400 bps.

Topología de la red

La topología de la red se traduce a conectar los Puestos de Salud con los Centros de Salud y estos últimos a su vez con hospitales o algún centro especializado de las capitales.

La conexión entre puestos, centros y hospitales son en su mayoría saltos punto a punto de decenas de kilómetros y a veces se conectan más nodos (normalmente tres) como punto a multipunto. Esta sería la red transporte.

En cada puesto de salud, la mayoría de las veces, hay un único equipo con lo que las redes locales no tienen mayor complejidad. En los centros es normal que haya varios equipos.

Resumiendo y generalizando, las redes tienen una topología bastante lineal con redes locales muy simples en cada nodo.

HF/VHF/UHF

Las tecnologías de radio HF y VHF, ampliamente utilizadas para las comunicaciones de voz semi-dúplex, pueden ser aprovechadas también para comunicaciones de datos; en EHAS se ha trabajado de manera especial para llevar al máximo la velocidad, la calidad y la robustez de los enlaces de datos sobre estas tecnologías, así como para conseguirlo con equipamiento de bajo costo. Una ventaja de estas tecnologías que no hay que perder de vista es que funcionan sin línea de vista entre los equipos terminales, y permiten comunicaciones con puntos donde nada más es

factible por su aislamiento en términos de lejanía y condiciones topográficas.

Servicio de voz: Los estudios de necesidades realizados en las zonas de actuación de EHAS muestran que el servicio más demandado por los usuarios es el de la voz, y especialmente en un ámbito local (para comunicar los propios establecimientos entre sí). La banda VHF/UHF (30-3000 MHz) resulta ser uno de los medios más fiables a la hora de garantizar la comunicación en zonas de cobertura de corta y media distancia sin visibilidad directa. Nótese que de haber visibilidad directa la tecnología WiFi podría ser empleada con mejores y notables prestaciones.

En la banda VHF/UHF mencionada anteriormente es posible conectar estaciones con buena calidad de voz en un radio aproximado de hasta 50km (según orografía de la zona). Esta banda presenta además gran estabilidad, y no depende de las condiciones medioambientales o del instante del día en que se encuentre.

La banda HF (3-30MHz), por contra, permite comunicaciones de larga y muy larga distancia (miles de kilómetros) gracias a un fenómeno conocido como propagación ionosférica. Este fenómeno consiste en la reflexión de las señales de radiofrecuencia en las capas altas de la atmósfera (la más importante de ellas situada a 250 km de altitud). El principal inconveniente de HF es la baja calidad de la transmisión, toda vez que las señales transmitidas se encuentran expuestas a diversos efectos de distorsión (absorción atmosférica, elevado ruido, un acusado multicamino, entre otros). Además, las condiciones de transmisión son extremadamente variables, en función del momento del día, estación del año, actividad de las manchas solares, tormentas ionosféricas, etc.

Transmisión de datos: Una vez satisfecha la necesidad fundamental que es la comunicación de voz, la transmisión de datos se convierte también en un complemento valioso, reaprovechando siempre el mismo equipo usado en voz. Las estaciones clientes están equipadas con un PC de usuario y un router radio independiente, conectado por red ethernet, encargado del interfaz entre PC y transceptor radio. Las velocidades de transferencia que permite un canal radio son relativamente bajas (velocidades de señalización de 9600 bits por segundo (bps) en el caso de VHF y 2500 bps en HF), pero suficiente para transmisión de correo electrónico (sin desestimar la posibilidad de acceso a páginas web e incluso a mensajería instantánea, que también está soportada).

El sistema de comunicación utilizado en EHAS está basado por completo en software libre,

lo que ha permitido una serie de modificaciones para mejorar el rendimiento (ha sido necesaria la implementación de sistemas de codificación más robustos y la mejora de los protocolos de comunicación para evitar la repetición innecesaria de paquetes de datos). El mayor logro ha sido el de implementar, con software libre, los diferentes niveles de la transmisión hasta obtener soluciones competitivas al nivel de módems comerciales, y a un coste mucho menor.

Tanto en VHF/UHF como en HF, la topología más habitual de las redes EHAS es la centralizada, en la que varios clientes se conectan a un mismo servidor con salida a Internet. Todo ello sin excluir otras topologías más complejas, que permiten cubrir territorios más amplios, en los que un servidor es, a su vez, cliente de otra subred.

Pasarela a la Red Telefónica Conmutada (RTC): La solución tradicional para el acceso a línea telefónica desde estaciones radio es el uso de un dispositivo hardware llamado phonepatch. Con estos dispositivos, un usuario radio puede -a través de micrófonos con teclado DTMF- realizar y recibir llamadas de la red telefónica conmutada. No obstante, un sistema basado en phonepatch tradicionales es excesivamente rígido, especialmente en un momento la telefonía por Internet (VoIP: voz sobre IP) está en clara expansión. Por esta razón, se ha desarrollado un phonepatch software propio, capaz de trabajar en colaboración con la centralita telefónica software de mayor difusión en la actualidad, Asterisk.

El phonepatch para Asterisk es totalmente configurable y compatible con transeptores HF y VHF. El esquema de red es similar al de la transmisión de datos: un servidor situado en un punto central conectado a Internet (VoIP) o RTC, se usa como estación de enlace para la comunicación con diversos clientes. Así, un usuario radio puede llamar y recibir llamadas de toda la red EHAS de teléfonos IP (sin coste alguno) y de la red analógica (para llamadas salientes, y para no complicar el sistema de tarificación, los usuarios usan tarjetas prepago).

Limitaciones: A continuación se recogen las principales limitaciones que presenta la tecnología radio VHF/HF:

- a) La comunicación de datos es muy lenta, limitando mucho los servicios a los que se puede dar acceso; la comunicación de voz y datos no pueden producirse simultáneamente.
- b) Los equipos de transmisión consumen mucho, lo cual encarece la instalación y disminuye el tiempo de disponibilidad diaria de los enlaces en instalaciones energéticamente autónomas;

- c) La voz semi-dúplex es difícil de adaptar a la red telefónica, y se necesita operar en frecuencias para las cuales hay que obtener una licencia, lo cual tiene implicaciones de coste y de escalabilidad.

Las limitaciones anteriores motivaron desde EHAS la investigación de otras tecnologías (Wi-Fi/WiMAX) que ofrecieran prestaciones mejores. En un principio se abandonan las comunicaciones vía satélite porque, si bien están disponibles en casi cualquier punto del globo, incumplen flagrantemente la limitación en el coste de operación; en general, instalar y operar el acceso a redes de comunicación por satélite es extremadamente caro, y de todas formas, en zonas rurales donde la población está muy dispersa, requieren de otras soluciones complementarias para la distribución de la conectividad.

Un pequeño inciso, hasta ahora no se ha mencionado ni tan siquiera, la posibilidad del uso de sistemas de cableado. Aunque en los países tecnológicamente más desarrollados sea lo que más se use por muchos motivos: debido a la mayor capacidad, mayor control sobre el medio, no necesita visión directa, menos problemas en cuanto a interferencias, mayor estabilidad del canal, etc. no es la tecnología más apropiada.

La obra civil es sumamente costosa. Por un lado, se necesitan licencias, por el otro, el despliegue consume mucho tiempo y material (zanjas de miles de kilómetros de cables cobre). Por ejemplo, es impensable trazar una zanja en el Napo (Perú) río arriba por la selva, donde EHAS tiene una red, inalámbrica montada.

El programa EHAS maneja un concepto de nodos autónomos, que se trata de torres alimentados mediante placas solares que abastecen de energía a los equipos de comunicación con las etapas de radio inclusive. De este modo el despliegue de infraestructuras, una vez montada la torre, es inmediata, eliminando cualquier tipo de dependencia eléctrica, sinceramente brillante.

WiFi/WiMAX

Con el uso de estas, relativamente nuevas, normas de telecomunicación, se da un gran salto tecnológico. Se da un salto a su vez en frecuencias pasando de MHz a hablar de GHz. La mayor limitación que ello conlleva, previamente mencionada, es la necesidad de línea de vista (LoS). Este hecho se traduce a la búsqueda de emplazamientos con mayor despejamiento posible para la instalación de las infraestructuras necesarias, es decir, la colocación de la torre de comunicaciones.

Cabe destacar que ambas tecnologías pueden operar en bandas no licenciadas, en la mayoría

de países, 2.4GHz en el caso de WiFi y la banda de 5GHz para ambas. Esto se traduce a que no haya que pagar por el uso del espectro radioeléctrico. Su mayor inconveniente suele ser, por una parte, la limitación de potencia que se suele regular y por la otra, el número de interferencias que uno se puede encontrar. La banda de 5GHz, minoritariamente usada en WiFi no está muy contaminada, sin embargo la banda de 2.4GHz a veces está saturada, debido a otras tecnologías que hacen uso de ella, como el Bluetooth, los hornos microondas, incluso los radio-contrales de grúas de construcción. Este último problema no tiene mayor repercusión en zonas rurales donde precisamente se carece de cualquier tipo de comunicaciones, luego, cualquier tipo de interferencia electromagnética.

A grandes rasgos la gran ventaja de WiFi es el bajo coste que tiene y el mayor inconveniente, la necesidad de adaptación para largas distancias -además de que el ancho de banda caiga en función de ellas- junto con la no garantía de la calidad de servicio (QoS), naturaleza estadística. Por otro lado la gran ventaja de WiMAX es disponer de mayor ancho de banda (más de 30Mbps a nivel MAC) con QoS garantizada -apenas sensible a la distancia-, siendo su gran inconveniente el elevado precio de los equipos.

Dichos estándares son introducidos en mayor profundidad en el Capítulo 2, en 2.2.4 y 2.3.8 respectivamente pero se adelantan algunas pinceladas.

WiFi sacó su primer estándar por el año 1997 y a día de hoy está muy consolidada. Las distancias para las que se diseñó, entorno local, son del orden de cientos de metros. Aun así, los productos de algunos fabricantes y aplicaciones puntuales han demostrado la posibilidad de utilizarlos para distancias muy superiores. Se citan a modo de ejemplo los siguientes casos:

- a) La Corporación Aeroespacial Sueca (SSC) logró en 2002 un enlace punto a punto de 300Km en la banda de 2.4GHz entre un equipo terrestre y otro en un globo troposférico, empleando equipos de Alvarion.
- b) La Red de Educación e Investigación en Redes Inalámbricas de Altas Prestaciones (HP-WREN), sostenida por dos universidades de San Diego, logró también en 2002 un enlace de 116Km entre la costa continental y la Isla de San Clemente, por encima del Océano Pacífico. Las interfaces WiFi empleadas eran comerciales, no se especifica en la información publicitada la marca.

- c) Estudiantes de la Weber University de Utah (USA) reportaron a la prensa en 2003 haber logrado un enlace de 132Km con equipamiento Cisco de la gama 350, transmitiendo 1.5W.
- d) Empresas como Mikrotik, en Letonia, y no pocos proveedores de acceso a Internet, sobre todo en países menos desarrollados en los que las redes de telefonía no brindaban los recursos necesarios para el acceso a redes de datos, experimentaron en estos años con enlaces punto a multipunto de hasta 12 Km de distancia entre estaciones, y punto a punto de hasta 40Km.
- e) Gente del mundo de las redes inalámbricas ciudadanas, empezando por Rob Flickener y continuando por múltiples equipos de diversas partes del mundo, lograron en los mismos años enlaces punto a punto de más de 80Km en zonas montañosas.

***Prototipo de router WiFi EHAS** El hardware WiFi necesita mucho menos consumo que los equipos VHF-HF. Usando equipamiento hardware WiFi y optimizando su consumo por varias vías, es posible fabricar nodos compactos autónomos que incorporen un subsistema solar de energía, eliminando así cualquier restricción con respecto a fuentes de energía. Como consecuencia de la investigación en esta tecnología se ha obtenido un primer prototipo de nodo solar inalámbrico mesh basado en placas x86, funcionando con una distribución propia de Linux.*

Esta primera versión ha sido usada para implementar una red WiFi en Cusco (Perú). Los enlaces inalámbricos punto a punto llegan hasta 42km en esa red, obteniéndose un throughput de 3.5Mbps en modo g. También se ha verificado experimentalmente la obtención de 1.2Mbps en un enlace de 84 km en selva en Colombia corriendo a la velocidad de 2M en modo 802.11b.

WiMAX En 2004 salió el primer estándar de WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) en la banda de frecuencias interesadas. Este estándar, IEEE802.16, es una tecnología precisamente pensada para redes WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) para satisfacer la necesidad de comunicación en zonas rurales poco poblados, sin necesidad de adaptación alguna para cubrir distancias de decenas de kilómetros. Intrínsecamente ofrece calidad de servicio gracias a su mecanismo determinista de acceso al medio. IEEE802.16e-2005 introduce el concepto de WiMAX móvil (cambio de celdas), poco relevante para los fines que se persiguen. 802.16-2009, reemplaza los 2 anteriores. 802.16j-2009 *Multihop Relay*, introduce un nuevo tipo estación muy útil a la hora de cubrir mayores coberturas.

Aunque ya hayan pasado unos cuantos años desde la primera versión es una tecnología que

parece que le cuesta florecer, no existe todavía un número elevado de fabricantes de equipos, menos todavía en bandas libres. Algunos de ellos además ofrecen soluciones propietarias que -a pesar de llamarse comercialmente WiMAX- infringen la *i* de interoperabilidad, respecto a equipos de otros fabricantes. También se les suele catalogar, en función de la aproximación a equipos post-WiFi o pre-WiMAX, un punto de polémica dentro de esta tecnología.

WiMAX vs LTE Últimamente se habla sobre la batalla de estas dos tecnologías inalámbricas para hacerse con el mercado de acceso inalámbrico a Internet.

LTE (Long Term Evolution) va en camino de convertirse el estándar para 4G, la siguiente generación de telefonía móvil que llegará sobre el 2010 al 2012 (en función del país) en detrimento de WiMAX, la otra tecnología candidata. Las tecnologías móviles de cuarta generación tiene objetivos como: ser capaces de conseguir velocidades de descarga de 100 Mbps en movimiento.

Se empiezan a hacer pruebas sobre LTE y surgen nuevos apoyos, mientras tanto, las compañías de móviles dejan de lado a WiMAX incluyendo Nokia, a pesar de ser una tecnología más madura. Recientemente Cisco [19], uno de los fabricantes de routers de transporte más potentes, también a anunciado su intención de dejar de fabricar estaciones base WiMAX.

LTE es un nuevo estándar de la norma 3GPP. Será la clave para el despegue del Internet móvil, servicios como la transmisión de datos a más de 300 metros y vídeos de alta definición que gracias a la tecnología OFDMA, serán de uso corriente en la fase madura del sistema. LTE está diseñado para el mundo de la telefonía móvil, cortas distancias y movilidad (a gran velocidad).

La 2G y 3G están basadas en técnicas de Conmutación de Circuito (CS) para la voz mientras que LTE da un salto evolutivo y propone la técnica de Conmutación de Paquetes IP (PS).

Aún así, WiMAX no ha perdido toda la batalla. Aparte de su popularidad en varios países asiáticos, todo apunta a que WiMAX se convertirá probablemente en una tecnología nicho, una tecnología adecuada para despliegues en áreas con bajas concentraciones de población y en aquellas que carezcan de infraestructuras anteriores. Por el otro lado, LTE tendrá sentido para las grandes operadoras y sobre todo en las grandes ciudades, pero WiMAX puede ser usado y ser económicamente viable para una empresa mediana, para un ayuntamiento, etc. para cubrir regiones o una ciudad en concreto. Es decir, cada tecnología cubrirá un nicho de mercado diferente.

Por todo ello, se concluye que para el ámbito de zonas rurales poco pobladas LTE no es una

apuesta interesante, de momento, y la discusión se centra más en WiFi adaptado o WiMAX.

1.3. Necesidad de una herramienta de planificación

La simulación de redes es, además de una valiosa herramienta para la investigación y desarrollo de nuevos protocolos y sistemas de comunicación, un instrumento extremadamente útil para el despliegue de redes reales. Una simulación, pese a sus limitaciones, permite estimar con un buen compromiso entre coste, complejidad y fidelidad las prestaciones de una red antes de su instalación.

El principal obstáculo con el que se topan los proyectos con presupuestos restringidos es el alto coste de las aplicaciones comerciales de simulación y despliegue de redes, básicamente debido a que éstos están dirigidos a las grandes operadoras de telecomunicaciones. Es por ello que el estudio se centra en herramientas gratuitas o de bajo coste (idealmente, software libre) con las que abordar el proceso de forma integral, desde la planificación de red (estudio de la orografía, emplazamiento de estaciones y repetidores, líneas de vista, arquitectura de red, etc), hasta la simulación y el modelado estadístico del comportamiento del tráfico.

De este modo se ofrece a los equipos de despliegue una herramienta simple, versátil y sistematizada de estimar las prestaciones en redes rurales como las Redes de Salud Latinoamericanas mencionadas durante este capítulo.

Introducción

2.1. Objetivos

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera (PFC) de Ingeniería de Telecomunicación es crear un herramienta de software libre o gratuita que facilite la planificación de redes rurales en países en vías de desarrollo.

La herramienta tiene que trabajar con modelos de terreno irregular, debido a la naturaleza de enlaces de largas distancias, en cualquier tipo de terreno, además de simular las tecnologías de comunicaciones inalámbricas de banda ancha WiFi y WiMAX.

La planificación de redes, como las que son objetivo de este proyecto, requieren tanto una planificación a nivel radio como un dimensionamiento a partir de los requisitos de uso. La arquitectura de la aplicación parte de la experiencia general de que no hay herramientas de software libre o gratuitas que faciliten toda la funcionalidad, pero sí hay herramientas separadas que cubren eficazmente cada parte de la funcionalidad requerida. Se van a identificar los componentes más adecuados mediante evaluación de las opciones disponibles y se va a implementar el software necesario para unir los elementos incorporados.

El propósito final es que se pueda realizar de manera fluida todo el proceso desde, la planificación radio hasta la obtención de estadísticos de red que resuman sus prestaciones.

La idea que persigue este proyecto es crear una herramienta que sea fácil de usar y lo más automatizada posible. La primera etapa, la planificación de radiofrecuencia, es un trabajo difícil de automatizar porque se trabaja de manera gráfica e interactiva; una vez superada esta etapa, se pretende que el usuario sea capaz de simular la red planificada a nivel radio, mediante la he-

herramienta que se desarrolle, abstrayéndose del funcionamiento del simulador de eventos discretos que subyace pero accediendo a todo su potencial.

A continuación, antes de hablar de la metodología que se sigue, se introducen con un breve resumen los dos estándares de comunicaciones inalámbricas que maneja la herramienta de planificación.

2.2. WiFi - IEEE802.11

Un ligero resumen del estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE 802.11 también llamado WiFi (Wireless Fidelity) [33].

2.2.1. Arquitectura de Red

Define dos distintos tipos de sistemas y varios modos de asociación entre los dispositivos: El modo infraestructura utiliza un patrón de Master/Slave siendo el maestro el punto de acceso, AP, y el esclavo la estación, STA. Las estaciones se conectan entre sí mediante un intermediario, el punto de acceso. Este modo es el que se aplica para punto a multipunto que a su vez funcionan en conexiones de punto a punto. El modo ad-hoc conecta directamente dispositivos sin necesidad de ningún elemento intermedio, utilizándose por ello en enlaces punto a punto. Aplicando este modo en toda la red se consiguen redes mesh, cuya ventaja principal es poder cubrir mayor área con menos equipos.

El estándar 802.11 define tanto la capa física, PHY, como la capa de acceso al medio, MAC. En la mayoría de ocasiones la siguiente capa, nivel 3, transportará el protocolo de internet, IP.

Dentro del mismo estándar, desde que se definió el estándar en 1997, han surgido diferentes familias que trabajan en distintas tasas de transmisión incluso en distintas frecuencias que mejoran las deficiencias detectadas y mejoran las algunas prestaciones. Cada familia añade una letra al nombre de la tecnología y se pueden describir brevemente las principales de la siguiente manera:

- 802.11, trabaja en la banda de 2.4GHz y alcanza tasas de hasta 2Mbps. Modulaciones utilizadas: DSSS
- 802.11a, trabaja en la banda de 5.8GHz y alcanza tasas de hasta 54Mbps. Modulaciones utilizadas: HR/DSSS

- 802.11b, trabaja en la banda de 2.4GHz y alcanza tasas de hasta 11Mbps. Modulaciones utilizadas: OFDM.
- 802.11g, trabaja en la banda de 2.4GHz y alcanza tasas de hasta 54Mbps. Modulaciones utilizadas: DSSS, OFDM.
- 802.11e, extensión que proporciona calidad de servicio (QoS) a redes 802.11a/g/h.
- Nota: Cuando se habla de tasas, se habla de tasas alcanzables a nivel físico.

2.2.2. PHY - Nivel Físico en IEEE802.11

La capa física conecta el medio físico, el espacio, con la capa de acceso. Desempeña principalmente tres funciones:

1. Transmitir al medio las tramas, utilizando diferente esquemas de modulación como DSSS, FHSS, OFDM...
2. Intercambiar las tramas con la capa superior, la capa MAC.
3. Ofrecer a la capa MAC mecanismos para detectar si el canal está libre (detectando la presencia de señales en la frecuencia de trabajo) y así evitar colisiones.

El nivel físico está a su vez dividido en dos capas independientes: PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) y PMD (Physical Medium Dependent).

La capa PMD es la que proporciona los medios reales para la transmisión y recepción de las señales radioeléctricas a través del medio inalámbrico utilizando DSSS. Se encarga de fijar el canal y convertir las secuencias binarias en señales (y viceversa). Ofrece una serie de funciones a la capa superior (PLCP) para la transmisión y recepción de las tramas PPDU (PLCP Protocol Data Unit). Proporciona además la capacidad de realizar lo que el estándar denomina CCA (Clear Channel Assessment), que consiste en la detección de energía o portadoras en el medio para decidir si se considera que está libre u ocupado. En el momento en el que se detecta la presencia de una señal a la frecuencia de trabajo del equipo, se indica a las capas superiores que el canal está ocupado. En caso contrario se considera que el canal está libre.

La capa PLCP se define para permitir que el nivel MAC opere con la mayor independencia posible con respecto a la subcapa PMD. La capa PLCP simplifica el interfaz entre el nivel físico y los servicios MAC. Las tramas a nivel MAC se denominan MPDU (MAC Protocol Data Unit) y se tratará sobre ellas más adelante. La capa PLCP convierte la trama MPDU en una trama PPDU y viceversa. En la transmisión la trama MPDU será precedida por un preámbulo y una cabecera PLCP. En la recepción se procesará la información en esos dos campos para ayudar a la demodulación y entrega de la trama MPDU a la capa MAC.

El enlace radio en IEEE802.11

El estándar IEEE802.11 original de 1997 especificaba tres técnicas de transmisión en el nivel físico: FHSS, DSSS e IR.

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): se basa en el ensanchamiento de la señal, mediante la multiplexación a través de un código, para minimizar las interferencias y el ruido. Trabaja también en la banda de frecuencias de 2,4GHz. Soporta las velocidades de 1Mbps y 2Mbps mediante el uso de las modulaciones DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) y DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) respectivamente. Su evolución es HR/DSSS (High Rate) que alcanza tasas de transmisión mayores.
- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) no llegó prácticamente a ser implementado.
- IR (Infrarrojos) ninguna tarjeta vio la luz.

Nuevas técnicas de modulación El estándar IEEE802.11b primero, y luego los estándares IEEE802.11a y IEEE802.11g, añadieron nuevas técnicas de modulación en la capa física logrando mayores velocidades de transmisión y una mayor robustez en la conectividad. A continuación se realiza un pequeño resumen de las principales aportaciones y características de cada uno de ellos.

IEEE802.11a trabaja en la banda de frecuencia de los 5GHz utilizando la técnica de transmisión OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Da soporte a velocidades de transmisión de 6Mbps a 54Mbps y ocho canales no interferentes de 20MHz. Esta banda de frecuencia está menos saturada que la de 2,4GHz, lo cual es una ventaja. La banda de 2,4GHz también es utilizada por algunos teléfonos inalámbricos, hornos microondas y equipos Bluetooth, Tiene el inconveniente de no ser compatible con el modo 11b.

IEEE802.11b trabaja en la banda de frecuencia de 2,4GHz utilizando el sistema de transmisión HR/DSSS. Mediante el uso de la modulación CCK (Complementary Code Keying) se da soporte a las velocidades de transmisión de 5,5Mbps y 11Mbps. Se cuenta a catorce canales (que pueden estar limitados a once ó trece según el país) de 22MHz, de los cuales se pueden utilizar simultáneamente hasta tres de forma no interferente.

IEEE802.11g fue desarrollado a raíz del importante problema de incompatibilidad entre los equipos de IEEE802.11a y IEEE802.11b. Además, la creación de este estándar atendía al interés en incrementar la capacidad de los equipos y redes WiFi. IEEE802.11g trabaja en la banda de frecuencia de 2,4GHz, manteniendo además los mismos canales y modulaciones de IEEE802.11b. Añade el sistema OFDM mediante el cual se soportan velocidades de transmisión de hasta 54Mbps.

2.2.3. MAC - Control de acceso al medio en IEEE802.11

El control de acceso al medio tiene como misión coordinar de la forma más eficiente posible el acceso al medio de transmisión de las distintas estaciones que lo comparten. La MAC 802.11 sigue la trayectoria de los estándares 802, adapta con éxito la MAC de Ethernet al contexto diferente de una red radio, esto se logra esencialmente reemplazando el CSMA/CD por CSMA/CA. La MAC tiene que vencer en 802.11 algunos retos específicos de la naturaleza inalámbrica de las redes WiFi, de los que se pueden destacar dos: El primero, la calidad fluctuante y no necesariamente óptima de los enlaces de radio. El segundo, la alta probabilidad de que las redes contengan nodos que puedan colisionar sin siquiera oírse, que es el llamado fenómeno del nodo oculto, y para el que se propone el mecanismo RTS/CTS.

Temporizaciones en el MAC de IEEE802.11

Aunque la capa MAC no es ranurada, sí que se define una duración de ranura *aSlotTime*, cuyo valor se fija en el nivel físico. Una ranura es cada una de las fracciones resultantes de particionar el tiempo en ranuras de igual tamaño con instantes de comienzo y fin perfectamente definidos. Para el caso DSSS se fija un valor de 20µs, si bien en 802.11g se da un valor alternativo opcional de 9µs, que se puede usar si se tiene la garantía de que todos los equipos involucrados lo soportan. El resto de tiempos definidos en la capa MAC fijarían su valor en función de la duración de slot del nivel físico subyacente. En el estándar se denomina IFS (Interframe Space) a los intervalos

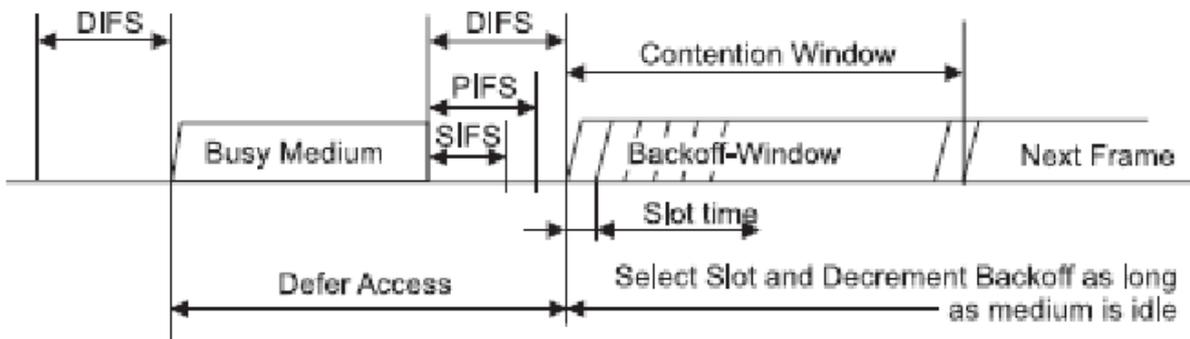


Figura 2.1: Esquema temporal de funcionamiento en el nivel MAC.

entre tramas. Se definen cuatro de ellos, ver la Figura 2.1 para proporcionar niveles de prioridad para el acceso al medio inalámbrico en función del tipo de trama y del modo de coordinación. Se citan los espacios en orden creciente:

- SIFS (Short Inter Frame Space).
- PIFS (Point Coordination IFS).
- DIFS (Distributed IFS).
- EIFS (Extended IFS).

Cabe señalar la existencia de un parámetro que se menciona vagamente en el estándar y para el que no se define claramente su valor: el ACKTimeout. Este parámetro marca el tiempo que debe esperar una estación que ha transmitido una trama a su correspondiente ACK. Una vez superado ese tiempo se considera que la trama se ha perdido y se da comienzo a una nueva retransmisión (si el ACK llega superado ese tiempo, se descarta y es como si no hubiese llegado).

Protocolo de contienda CSMA/CA

El protocolo CSMA/CA se ha diseñado para tratar de reducir la probabilidad de que se produzca una colisión entre las tramas de dos o más estaciones transmitiendo de forma simultánea. Dicha probabilidad es máxima justo cuando el medio queda libre, puesto que las estaciones que estuviesen esperando para transmitir intentarían hacerlo a la vez. Es por ello que se necesita un

procedimiento por el que las estaciones esperen un tiempo aleatorio antes de volver a comprobar si el medio está libre para transmitir.

En primer lugar se procederá a la escucha del canal y una vez que se detecta que el canal está libre la estación espera un tiempo DIFS. Si una vez transcurrido este tiempo el canal sigue libre, la STA generará un periodo adicional de espera que se denomina ventana de contienda (CW, Contention Window), cuyo valor será un número aleatorio de veces el tamaño del *aSlotTime*. Si durante la espera por la ventana de contención se detecta otra trama en el medio, se congela el temporizador y no se transmite ni se sigue la cuenta atrás. Una vez que el medio vuelve a quedar libre se espera nuevamente el tiempo DIFS y se reanuda la cuenta atrás de la CW donde se detuvo. Cuando la CW alcanza el valor cero, se transmite la trama. Si dicha trama tenía un solo destinatario (era unicast), la estación transmisora queda a la espera de recibir la correspondiente confirmación (ACK). El receptor recibe la trama y comprueba su CRC mientras espera un tiempo SIFS y luego envía la trama ACK para confirmar. Las tramas broadcast no se confirman, al igual que las multicast.

Cuando se produce una colisión en una trama unicast, el resultado es que el transmisor no recibe correctamente la confirmación de la trama y la intenta retransmitir hasta un número de veces máximo que por defecto son 7 para el servicio de dos tramas y 4 para tramas transmitidas mediante el servicio RTS/CTS, si bien esos valores se pueden modificar. A cada retransmisión el tamaño de la ventana de contienda se calcula según una variable aleatoria uniforme entre (0, CW), pero el valor CW se va duplicando a cada retransmisión hasta llegar a un valor máximo, en el que se mantiene. Los tamaños mínimo y máximo de CW dependen del PHY, siendo los rangos más usuales el de DSSS (31, 1023) y el de ERP/OFDM (15, 1023). El proceso termina cuando la trama se logra transmitir con éxito (y se recibe confirmación) o se descarta por haberse alcanzado el máximo de retransmisiones sin éxito; en cualquiera de esos casos, la siguiente se intenta transmitir otra vez con ventana de contienda mínima.

Si una trama es demasiado larga, el nivel MAC puede proceder a su fragmentación y transmisión mediante ráfagas. En este caso el transmisor tan solo espera el tiempo SIFS entre fragmento y fragmento de forma que ninguna otra estación pueda ganar acceso al medio hasta que no termina de transmitirse y confirmarse la ráfaga completa.

RTS/CTS y el problema del nodo oculto

En el estándar WiFi se definen dos mecanismos para conocer la disponibilidad del canal, uno físico y otro virtual. Si cualquiera de los dos indica que el medio está ocupado el nivel MAC esperará para poder iniciar la transmisión. El mecanismo físico se basa en la detección real de una portadora en el medio (a la frecuencia de trabajo). El mecanismo virtual se basa en la distribución de información anunciando el uso inmediato del canal. El intercambio de tramas RTS y CTS de forma previa a la transmisión de la trama de datos es un medio para la reserva del canal de comunicaciones. Dichas tramas contienen un campo Duration/ID que define el periodo de tiempo que la estación origen se reserva el medio para transmitir la próxima trama y su correspondiente ACK. De esta forma el resto de estaciones dentro del rango de la estación emisora (que transmite la trama RTS) y de la receptora (que transmite la trama CTS), son informadas de que el medio está reservado y que deben esperar sin transmitir ese tiempo, aunque el medio esté aparentemente libre. Se emplea un contador denominado NAV (Network Allocator Vector) en cada sistema para controlar el tiempo que se debe esperar porque el canal está reservado.

Este mecanismo se diseñó para tratar de solucionar la denominada problemática del nodo oculto, de la cual se expone a continuación un ejemplo: tres estaciones A, B y C, las cuales pueden establecer enlaces A B y B C, pero las estaciones A y C se encuentran demasiado lejos una de la otra y no pueden recibir sus respectivas señales. En un modo de funcionamiento normal, cuando la estación A transmita, la estación C detectará que el medio está libre y transmitirá (si le interesa), lo que dará lugar a una colisión de ambas tramas en la estación B. Si se activa el mecanismo RTS/CTS la estación A enviará la trama RTS. Cuando la estación B reciba la trama RTS transmitirá la trama CTS que será recibida por las estaciones A y C. De esta forma la estación C sabrá que se ha reservado el medio y no transmitirá en ese tiempo, proporcionando a la estación A la garantía de que su transmisión estará libre de colisiones. Las tramas RTS y CTS son muy cortas, por lo que las probabilidades de que se produzca una colisión que las implique son mucho más reducidas que si se transmite directamente una trama de datos de gran tamaño. Éste mecanismo no debe utilizarse para todas y cada una de las transmisiones de tramas de datos puesto que implica una sobrecarga extra debido a la transmisión de tramas adicionales sin datos; en tramas largas, ofrecen la ventaja de que una colisión del paquete RTS es mucho menos perjudicial que la colisión de la trama de datos, pero en tramas cortas (p.e. paquetes de VoIP) carece de sentido usar este mecanismo. Por este motivo se define el atributo RTSThreshold, que

es el tamaño en bytes de una trama de datos a partir del cual se utiliza el mecanismo.

2.2.4. WiFi para largo alcance

En el capítulo anterior, al introducirse WiFi, se han citado casos de exitosos enlaces a largas distancias, ver sección 1.2.3. A continuación se discuten los límites de este potente estándar, es decir, que es lo que hay que modificar para obtener “WiFi de largo alcance” [65].

Los límites de WiFi

Límites físicos al alcance de WiFi Una cuidadosa revisión del estándar no deja entrever ningún elemento de la capa física que limite el alcance de las comunicaciones WiFi en términos de distancia si no es el balance de enlace. Los límites físicos de distancia alcanzable con WiFi dependerán, por lo tanto, de los siguientes parámetros:

- La máxima potencia que se pueda transmitir (PIRE).
- Las pérdidas de propagación.
- La sensibilidad de recepción.
- La mínima relación señal a ruido que se esté dispuesto a aceptar como suficiente.

El propio estándar determina que los límites de potencia que se puede transmitir dependen de la legislación que atañe a la banda de frecuencias ISM 2.4GHz para cada región geográfica, mostrando la Tabla 2.1.

Máxima potencia transmisible	Dominio legal	Normativa
1000 mW	USA y muchos países en desarrollo	FCC 15.247
100 mW	Europa	ETS 300 328
10 mW	Japón	MPT ordinance for Regulating Radio Equipment, Article 49-20

Tabla 2.1: Máxima potencia transmisible en 2.4GHz por regiones.

Limites a nivel MAC En ningún estándar de la familia IEEE 802.11 se imponen restricciones explícitas de distancia, pero es patente que éstas existen porque los resultados lo demuestran y porque la capa MAC tiene multitud de tiempos constantes definidos que tienen diferente efecto en función de la distancia que haya entre estaciones. Tras una revisión cuidadosa del estándar base IEEE 802.11, se pueden extraer tres tipos de limitaciones: el temporizador de espera de los ACKs, la definición de tiempos relacionados con el tamaño de la ranura, y el cálculo del NAV para la detección de portadora virtual.

- **ACKTimeout:** Este parámetro se define en el texto del estándar como el tiempo en que la estación transmisora espera la llegada del ACK una vez finalizada la transmisión de un paquete. Así pues, para que una comunicación WiFi funcione a una determinada distancia se tiene que cumplir que el ACKTimeout sea mayor que el tiempo de propagación de ida y vuelta más el SIFS que separa la recepción del paquete de la transmisión de su ACK en el receptor. No obstante, el estándar no da un valor claro a este parámetro, y los equipos WiFi del mercado varían mucho en su implementación del ACKTimeout; algunos sistemas tienen un valor por defecto de aproximadamente DIFS+SIFS pero que se puede modificar, y otras tienen valores no modificables pero más grandes. Cuando una estación intenta enviar un paquete a otra que está demasiado distante como para recibir de ella el ACK antes de ACKTimeout, transcurrido este tiempo se interpretará que la transmisión falló y se retransmitirá; como lo mismo le sucede a cada retransmisión, cada paquete se retransmitirá el máximo número de retransmisiones antes de descartarse y dejar paso al siguiente. La capa WiFi de la estación transmisora creerá que no logró mandar el paquete, pero de hecho lo probable es que hayan llegado correctamente varias copias de éste, de las que la primera se pasará a la capa superior en el receptor. El resultado es que el enlace funciona, pero con un rendimiento ínfimo debido a que todo se retransmite varias veces, por defecto, 7.
- **Tiempo de ranura e IFS.** El valor del tiempo de ranura, de SIFS y de DIFS imponen restricciones al funcionamiento del MAC de WiFi a partir de ciertas distancias. El estándar prevé que las estaciones que transmiten son oídas por las otras dentro del mismo slot en que se ha producido la transmisión, lo cual impone un límite de unos 3Km. Más allá de esa distancia, las prestaciones de los enlaces empeoran con la distancia, aunque aún resultan utilizables si el número de nodos activos es suficientemente bajo.

- La vulnerabilidad con nodos ocultos. En IEEE 802.11 se emplea el mecanismo RTS/CTS para evitar colisiones entre nodos ocultos; no obstante, ese mecanismo funciona si el cómputo del NAV se corresponde con el tiempo que verdaderamente el canal va a permanecer ocupado; puesto que el NAV no se calcula teniendo en cuenta el tiempo de propagación, a medida que la distancia aumenta su efectividad empeora; en enlaces punto a multipunto con distancias del orden de kilómetros, el RTS/CTS es prácticamente inservible, y no hay un mecanismo alternativo. En definitiva, WiFi puede servir, aunque con cierta pérdida de prestaciones, para enlaces punto a punto de larga distancia si los equipos terminales permiten configurar el ACKTimeout; en cambio, para punto a multipunto el funcionamiento es notablemente peor a menos que la carga ofrecida y el número de nodos sean muy bajos.

2.3. WiMAX - IEEE802.16

WiMAX son las siglas de *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas) [35] siendo una norma de transmisión de datos usando ondas de radio.

Es una tecnología dentro de las conocidas como tecnologías de última milla, también conocidas como bucle local que permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio. El protocolo que caracteriza esta tecnología es el IEEE 802.16. Una de sus ventajas es dar servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de cable o fibra por la baja densidad de población presenta unos costos por usuario muy elevados (zonas rurales).

El único organismo habilitado para certificar el cumplimiento del estándar y la interoperabilidad entre equipamiento de distintos fabricantes es el WiMAX Forum [2]: todo equipamiento que no cuente con esta certificación, no puede garantizar su interoperabilidad con otros productos.

Los perfiles del equipamiento que existen actualmente en el mercado; compatibles con WiMAX, son exclusivamente para las frecuencias de 2,5 y 3,5 GHz como puede comprobarse en la base de datos de WiMAX Forum.

El estándar, por el 2001, empezó a desarrollarse para trabajar en frecuencias superiores, 10-63GHz, y más adelante también en 2-11GHz, sin repercusión comercial.

Existen otro tipo de equipos (no estándares) que utilizan la banda de frecuencia libre de licencia de 5,4 GHz. En este caso se trata de equipamiento que no es interoperable entre los

distintos fabricantes, también conocidos como post-WiFi o pre-WiMAX. No hay que olvidar que IEEE802.11a también opera en esa banda.

Actualmente el estándar que se está usando es IEEE802.16-2009 que engloba las dos vertientes más importantes que previamente trabajaban en paralelo: WiMAX (fijo) y WiMAX Móvil, o como lo suelen describir *Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access System*.

2.3.1. WiMAX - PHY

El diseño de la capa física de WiMAX está muy influenciado por WiFi, especialmente por 802.11a. Sin embargo, la capa MAC no tiene nada que ver. Ambas utilizan la técnica de modulación OFDM. En WiMAX, los parámetros de la capa PHY, como el número de subportadoras, pilotos, bandas de guarda y demás, son específicos para las distancias que se han diseñado (mucho mayores que en WiFi).

El ancho de banda del canal es configurable (1.25, 5, 7.5, 10MHz) siendo el de 10MHz con FFT de 256 puntos (OFDM-256) el más habitual. Menores anchos permiten mayor alcance, menos SNR, pero se pierde en tasa de transmisión. A nivel físico se dice que el límite superior teórico consta de unos 37Mbps. Toda el potencial de este estándar reside en la capa MAC, cuyas implementaciones suelen sobrepasar el 90 % de eficiencia en cuanto al throughput, con tasas superiores a los 34Mbps a nivel MAC. Es decir, aunque en WiFi se tienen throughputs superiores a nivel PHY, a nivel MAC WiMAX tiene muchas más prestaciones, a nivel de aplicación WiMAX tiene mayor ancho de banda.

Por lo tanto se centra la descripción en la compleja pero eficiente capa MAC.

2.3.2. WiMAX - MAC

La capa de acceso al medio del estándar es un sistema entramado, lo cual hace que sea puramente determinista. A raíz de ello, es capaz de ofrecer una calidad de servicio garantizada. El entramado, es un sistema de tramas, con un orden preestablecido, cuyas estructuras están perfectamente definidas en el tiempo.

2.3.3. Soporte a la capa PHY dentro de la capa MAC

Para la separación entre el uplink (UL) y downlink (DL) se utilizan mecanismos de duplexado en frecuencia (FDD) y en tiempo (TDD). En el primero, ambas subtramas (UL y DL) tienen

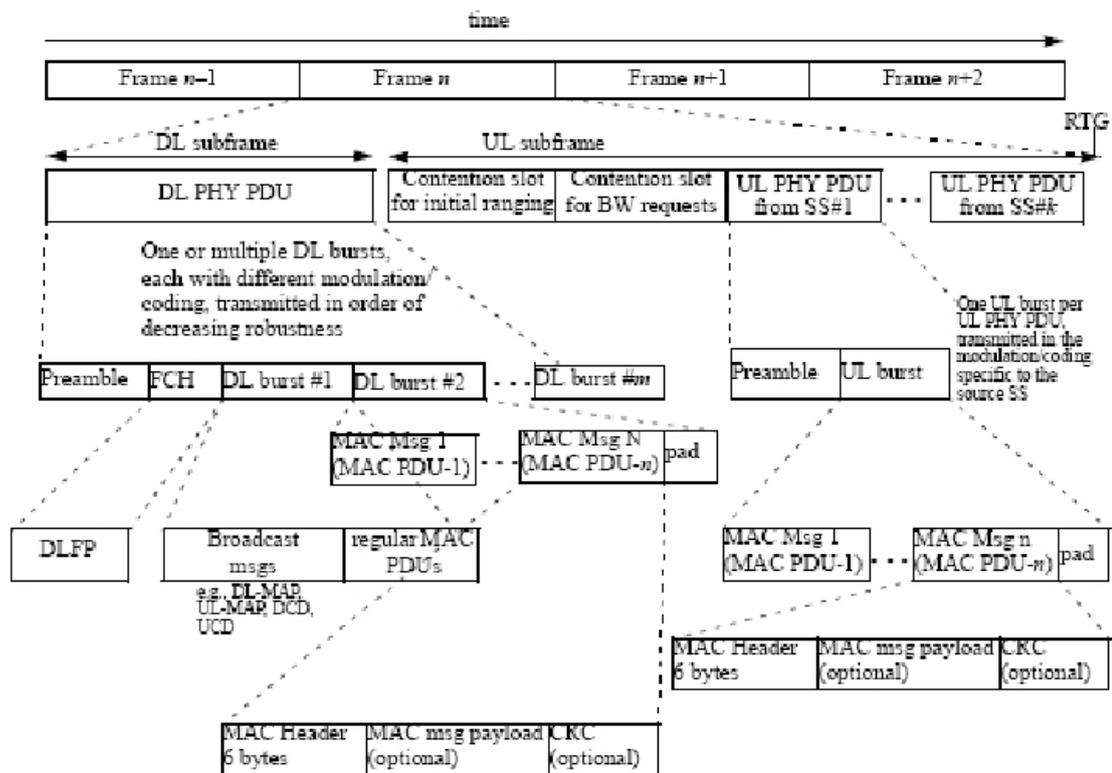


Figura 2.2: Trama TDD.

una longitud fija, mientras que en el segundo el tamaño de ambas se puede ir modificando dinámicamente, lo que permite una mejor adaptación a tráficos asimétricos. En el caso de TDD, el único método permitido en las bandas no licenciadas, la trama comienza con una subtrama de control que se encarga de definir el contenido de la trama, una subtrama de downlink, en la que la BS se comunica con las SS, y una subtrama de uplink en la que las SS se comunican con la BS.

Como se puede ver en la Figura 2.2, únicamente se divide la trama entre subtrama de uplink y subtrama de downlink, puesto que se considera que como los datos de la subtrama de control se envían desde la BS a las SS, se considera a ésta parte de la subtrama de downlink. La subtrama de control, o el intervalo de control dentro de la trama de downlink, está compuesto por:

- FCH: Que indica la longitud de la siguiente ráfaga en el Downlink (DL), en la que se describe la trama, por lo que el FCH ayuda a las SS a interpretar la primera ráfaga del

DL. Tiene un símbolo de duración.

- DCD (Downlink Channel Descriptor): Como su propio nombre indica se encarga de describir físicamente el canal del downlink. Puede contener infinidad de datos, entre ellos, los más importantes son: la frecuencia central, el identificador de la BS (BS Id), los perfiles de ráfaga permitidos en el DL.
- UCD (Uplink Channel Descriptor): Como su propio nombre indica se encarga de describir físicamente el canal del uplink. Entre los valores que puede definir, se encuentran los tamaños máximos y mínimos de las ventanas de backoff para el mecanismo de resolución de contienda en los intervalos de Ranging (entrada en la red de un SS nueva) y Request (solicitud de ancho de banda), los perfiles de ráfaga permitidos y el tamaño de la Transmision Oportunidad en ambos intervalos de contienda (Ranging y Request).
- DL-MAP y UL MAP. Ambos son muy similares, salvo que en el UL-MAP se define el parámetro Allocation Start Time que indica el momento de la trama en el que comienza la subtrama de UL. Por lo demás, ambos pueden estar compuestos de uno (o varios) Elementos de Información (UL-MAP IE's y DL-MAP IE's) que definen los intervalos que conforman cada una de las subtramas (UL y DL). Cada uno de ellos, a su vez, está compuesto, entre otros campos, de:
 - El CID al que va dirigido ese intervalo, ya sea multicast, broadcast o dedicado.
 - El UIUC o DIUC, que identifica el tipo de mensaje en el intervalo.
 - La duración del mensaje en unidades de tiempos de símbolo OFDM (incluyendo todos los preámbulos).
 - El índice de subcanalización que indica en cuantos grupos se dividen las 192 subportadoras de datos existentes dentro del símbolo OFDM2 . Éstas subportadoras se utilizarán para la transmisión de datos en el intervalo indicado por duración.
 - El Start Time que indica el tiempo, en unidades de tiempos de símbolo OFDM, (en el caso de los UL-MAP IE's relativo al Allocation Start Time), donde comienza la región de tiempo especificada por el mensaje.

Por lo tanto los distintos MAP IE's que conforman el DL-MAP y el UL-MAP dan una forma bidimensional a la subtrama del uplink: divididos en el tiempo (duración en símbolos OFDM) y

en frecuencia (subportadoras utilizadas).

2.3.4. Inicialización de un nodo de la red

El proceso de entrada de un nueva estación en una red WiMAX es un proceso complejo que consta de varias etapas. A continuación menciona cada una de ellas haciendo hincapié en aquellas del modo de retransmisión multisalto.

La selección de la estación de acceso es el primer paso a realizar por una estación cuando se de el caso de estar escuchando a varias a la vez. En el caso de las estaciones retransmisoras se basa en el parámetro `end-to-end metric` del DCD.

La obtención de los parámetros de transmisión se realiza tras la sincronización de las dos estaciones. La estación que se conecta ha de esperar un UCD que indique el conjunto de parámetros del UL. Para que la estación pueda transmitir solo le falta la asignación de ancho de banda.

El alineamiento inicial y ajustes automáticos se realizan para correcciones de temporización y de potencia para operar en sincronía. Durante el alineamiento inicial la estación no puede transmitir por encima de una potencia máxima que relaciona: la estimación del canal, la PIRE de la BS y de la SS. Para poder realizar estos ajustes la SS previamente tiene que enviar un mensaje en el intervalo reservado en las tramas de la MAC WiMAX para el alineamiento inicial. Este intervalo está dividido en slots. Se elige aleatoriamente un slot del conjunto y envía un código. Si la estación se hace con el canal recibirá un mensaje de la BS, RNG-RSP (Ranging-Response), con el código y slot que acaba de usar. Una vez ajustada la SS a la BS, en un intervalo en la siguiente UL-MAP podrá la SS responder con un RNG-REQ, para recibir de nuevo un RNG-RSP que contienen los identificadores de conexión (CID) básico y primario.

La negociación de capacidades básicas se lleva a cabo tras la obtención de los CID. La opciones de operación básica son aquellas que necesita el proveedor de servicios de red para comunicarse con la estación. Entre estos destacan los intervalos entre transmisión y recepción, y las potencias máximas utilizables con cada modulación.

La autorización e intercambio de claves es una fase opcional, que se encarga de controlar que SS acceden a la red.

El registro es el procedimiento a través del cual se le permite a una SS pasar a formar parte de la red. La SS manda una REG-REQ (Register-Request) y recibe a cambio una REG-RSP. Las estaciones que lo requieren obtienen el CID de su conexión secundaria en esta respuesta. Las conexiones secundarias permiten a la BS manejar más eficientemente a las SS. La REG-REQ incluye información sobre las opciones que soporta, entre ellas: la cantidad de conexión de transporte, características de su subcapa de convergencias, el soporte de ARQ,... REG-RSP contiene la información sobre las características que soporta la red. Si la BS tiene provisionadas conexiones para la SS se lo indica en este mensaje.

El establecimiento de las conexiones provisionadas se realiza tras el registro. Leyendo el fichero de configuración se establecen las conexiones pre-provisionadas, si existen. La base manda una mensaje DSA-REQ para establecer estos flujos de servicios. El mensaje contiene los parámetros QoS y su CID. La SS responde con un DSA-RSP para confirmarlo.

2.3.5. Mecanismos de solicitud y gestión de ancho de banda

En redes punto multipunto de WiMAX, la estación base es la única estación capaz de gestionar los recursos de la red. La solicitud de ancho de banda es iniciativa de las estaciones suscriptoras y la asignación es una funcionalidad de la base.

2.3.6. Provisión de la calidad de servicio

Una de las características más importantes de WiMAX es su capacidad de garantizar los recursos que se le asignan las estaciones suscriptoras, es decir, garantiza la calidad de servicio. Cada paquete que viaja por la red pertenece a un flujo de servicio identificado por un TCID (Transport Connection Identifier). Es importante resaltar que todo el intercambio de información se lleva a cabo en un contexto de conexiones. Para asignar los paquetes provenientes de capas superiores a cada una de las conexiones de transporte de una misma SS, éstos han de cumplir una serie de criterios definidos para cada conexión, denominados clasificadores. Estos clasificadores proporcionan una gran flexibilidad ya que pueden mapear paquetes en función del puerto del

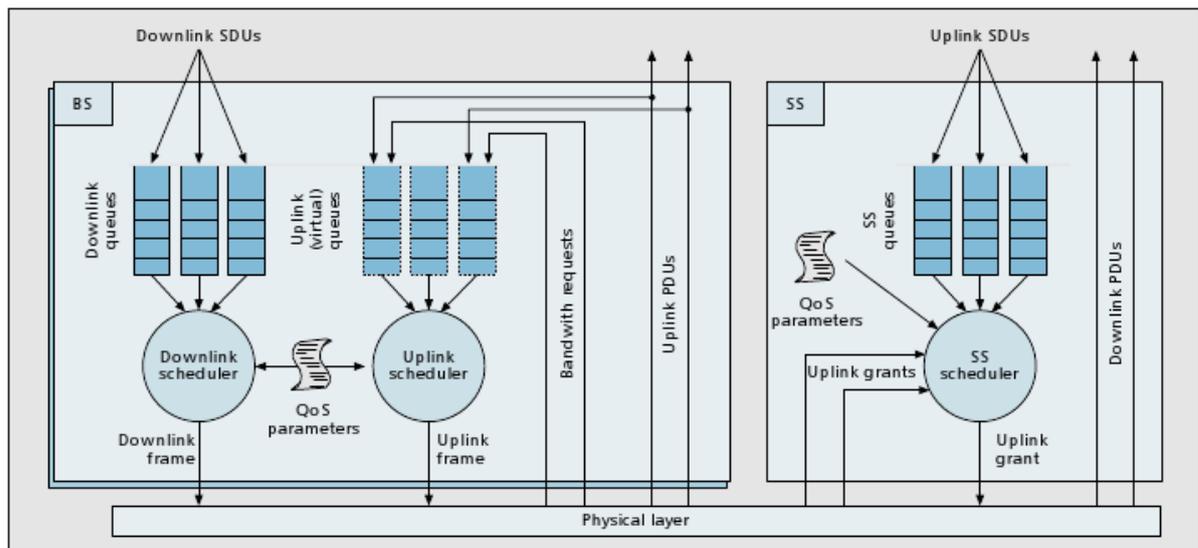


Figura 2.3: Funcionamiento de la QoS dentro de las estaciones.

que provengan, del protocolo de transporte que utilicen, del tipo de servicio al que pertenezcan (a través del campo DSCP del protocolo IP), etc.

Para proporcionar QoS a estas conexiones, se mapean las conexiones a nivel MAC a unos flujos de servicio (una conexión por flujo de servicio). Un flujo de servicio es un flujo unidireccional de paquetes que contiene los parámetros de tráfico de la aplicación a la que pertenece el paquete. En una red pueden existir tantos flujos de servicio como se desee tanto en el enlaces descendente o DL (Downlink), como en el ascendente o UL (Uplink). En función de los parámetros de tráfico de cada flujo de servicio, sus paquetes serán tratados de una forma concreta para que todos alcancen la QoS requerida por la aplicación.

Los servicios de planificación, por tanto, representan el mecanismo de manejo de datos utilizado por el planificador MAC para que el transporte de datos en una conexión se ajuste a las especificaciones de QoS de su flujo de servicio.

Una vez introducidos los distintos conceptos se describe en detalle cada uno de ellos.

2.3.7. Flujos de Servicio

Los flujos de servicio están caracterizados por un conjunto de parámetros de QoS, como throughput, retardo o latencia.

2.3.8. Servicio de planificación

Los servicios de planificación representan los mecanismos de manejo de paquetes soportados por el planificador MAC para el transporte del tráfico de una conexión de datos. La MAC de WiMAX soporta cinco tipos distintos de servicios que se muestran del más prioritario al menos:

- Unsolicited Grant Service (UGS)
- Real-Time Polling Service (rtPS)
- Extended Real-Time Polling Service (ertPS) ¹
- Non Real-Time Polling Service (nrtPS)
- Best Effort Service (BES)

UGS se ha diseñado para tráfico CBR, como por ejemplo emulación de T1/E1, *Carrier Circuits*, o VoIP sin supresión de silencios. Una vez asignado un servicio UGS a una SS, la BS asigna periódicamente el ancho de banda requerido, sin necesidad de una previa solicitud (de ahí el nombre). Esto permite eliminar el overhead y disminuye la latencia. El conjunto de los parámetros de QoS que un flujo de servicio UGS ha de definir son:

- Minimum Reserved Traffic Rate*
- Maximum Sustained Traffic Rate
- Maximum Latency
- Tolerated Jitter
- Request/Transmission Policy

La mayoría de parámetros son autoexplicativos, el parámetro *Request/Transmission Policy* debe determinar que mecanismos de *Grant/Request* puede utilizar la conexión. Este tipo de flujos es el único que no puede utilizar el mecanismo *Bandwidth Request* para solicitar ancho de banda. En UGS *Minimum Reserved Traffic Rate* es igual a *Maximum Sustained Traffic Rate*, tráfico CBR.

¹El servicio de planificación ertPS es opcional por lo que no todos los sistemas lo implementan.

rtPS se ha diseñado para tráfico de datos en tiempo real, con paquetes de longitud variable y transmitidos de forma periódica, como por ejemplo vídeo o audio streaming o VoIP con supresión de silencios. El conjunto de parámetros de QoS que un flujo de servicio rtPS ha de definir son:

- Minimum Reserved Traffic Rate
- Maximum Sustained Traffic Rate
- Maximum Latency
- Request/Transmission Policy

Como este servicio de planificación se basa en proporcionar oportunidades de solicitudes de transmisión dedicadas de forma periódica, *Request/Transmission Policy* no debe permitir solicitudes contenidas.

nrtPS se ha diseñado para tráfico de datos que no sean en tiempo real, tráfico que genera ráfagas de paquetes de tamaño variable. Estas conexiones toleran mayor retardo. Se ajusta muy bien a accesos a Internet o conexiones a servidores a FTP. El conjunto de parámetros de QoS que un flujo de servicio rtPS ha de definir son:

- Minimum Reserved Traffic Rate
- Maximum Sustained Traffic Rate
- Traffic Priority
- Request/Transmission Policy

Request/Transmission Policy debe permitir solicitudes contenidas.

BES se ha diseñado para navegación por Internet, es decir, flujos de datos que no requieren un mínimo de ancho de banda y pueden ser transmitidos cuando exista ancho de banda disponible. El envío de solicitudes se hace mediante slots de acceso aleatorio. El conjunto de parámetros de QoS que un flujo de servicio BES ha de definir son:

- Maximum Sustained Traffic Rate
- Traffic Priority

- Request/Transmission Policy

Request/Transmission Policy es similar a la de nrtPS pero la longitud de los intervalos es mayor.

Resumiendo, la planificación de una BS debe tener en cuenta (a parte de lo que estime oportuno):

- El servicio de planificación especificado para cada flujo de servicio activo
- Los valores asignados a los parámetros QoS del flujo de servicio activo.
- La disponibilidad de datos para transmisión.
- La capacidad del ancho de banda garantizado.

Arquitectura de la herramienta

3.1. Metodología

A pesar de que los simuladores de red incorporan habitualmente sus propios modelos físicos de propagación, el uso de un simulador de cobertura de red es ineludible. En redes cuyos nodos están separados grandes distancias la orografía del terreno pasa a jugar un papel decisivo y es por tanto necesario recurrir a modelos de propagación más sofisticados que los modelos estadísticos utilizados en zonas urbanas donde el multitrayecto cobra importancia. Esta es, pues, la razón de integrar dos tipos de simuladores distintos en la herramienta de planificación.

Este proyecto a seguido la siguiente metodología de trabajo:

En la primera etapa, se hace un repaso de simuladores radio-eléctricos y a la gran cantidad de simuladores de red disponibles, atendiendo -además de cuestiones estrictamente técnicas- a criterios tan fundamentales como el estado y vitalidad actual en su desarrollo y la existencia de una comunidad alrededor de la aplicación. En el propio título del proyecto se adelanta la elección, siendo **Radio Mobile** el encargado de simulador de la parte radio-eléctrica y **ns-3** de la parte de simulación de red propiamente dicha.

Acto seguido, se desarrolla el software necesario que sirve de interfaz entre el simulador de radio y el simulador de red escogidos. Este adaptador o acoplador sirve para unir ambos simuladores, es decir, convierte la información de salida del primero en la entrada del segundo.

La siguiente etapa, es desarrollar una capa software sobre el simulador de red que permita, a partir de la información de entrada del simulador de red (la salida del adaptador software), simular la red lo más automatizado posible. De este modo se ofrece al usuario la posibilidad de

simular redes -en un simulador de eventos discretos tras la simulación radio-eléctrica- con tan solo unas pequeñas modificaciones sobre un script principal, es decir trabajar a un nivel mucho más alto que trabajar directamente sobre el simulador de eventos discretos. El usuario que planifique la red pueda abstraerse totalmente de la capa inferior, es decir, del simulador que esté usando en particular.

Esta base es la encargada de todo lo que implica en el simulador de red una simulación, a grandes rasgos es:

- Creación y colocación de los nodos.
- Establecer la visibilidad radio-eléctrica entre los nodos (mediante los datos fruto de la simulación en Radio Mobile).
- Instalación de las interfaces (tanto WiFi como WiMAX)
 - En el caso de WiFi: adaptar los parámetros necesarios para largas distancias.
- Instalación de pilas de protocolos en ellas.
- Generación de tablas de enrutamiento.
- Instalación de sistema de monitorización de tráfico en todos los nodos.
- Creación de flujos de tráfico.
- Ejecución de la simulación.
- Muestra de presentaciones de la red.

Este último punto, gracias a la instalación del sistema de monitorización de tráfico, se generan resultados gráficos de varios parámetros, siendo el caudal y el retardo los más destacables, y trazas de tráfico procesables con software especializado en su lectura.

En el apartado siguiente se describe la arquitectura completa del planificador de red.

3.2. Diagrama de bloques

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura de la herramienta.

- Las cajas rectangulares azules con bordes redondeados son software existente.

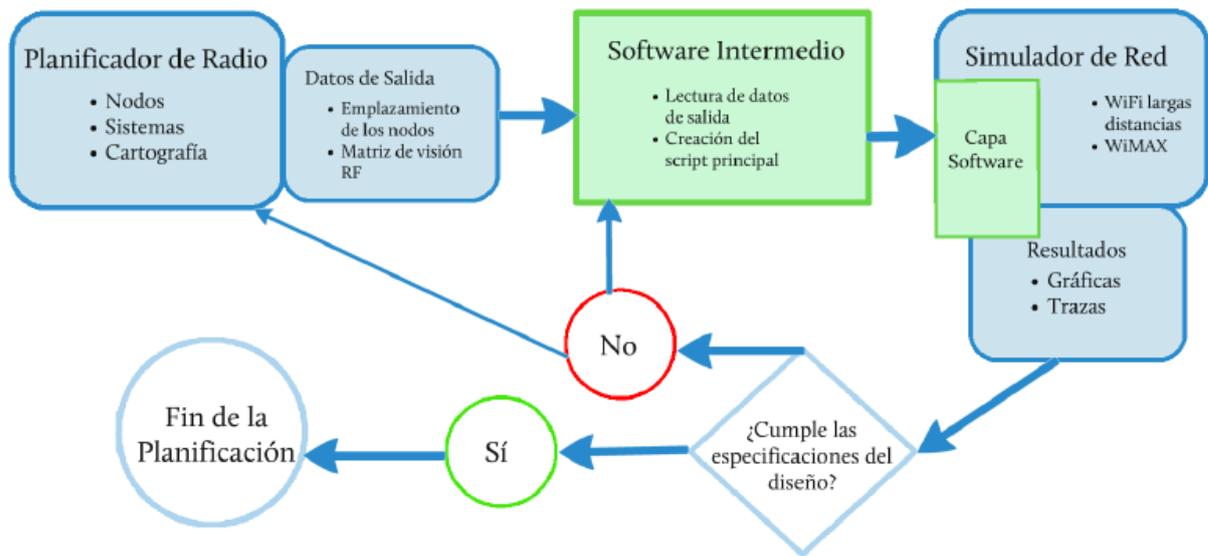


Figura 3.1: Arquitectura de la herramienta de planificación.

- Las cajas rectangulares verdes son el software ha desarrollar en este proyecto.
- El resto, flechas, círculos y el rombo; son pasos lógicos.

La arquitectura de la aplicación parte del simulador de coberturas en radio-frecuencia que trabaja sobre modelos de terreno irregular (ITM) y que es capaz de generar un reporte de salida con información de la red. Este resumen de la red se analiza mediante un software adaptador que genera un fichero texto que se lee y se interpreta en el simulador de red de eventos discretos para construir la red y simularlo. Una vez acabada la simulación se procesan las trazas de tráfico para obtener los resultados de la medición del comportamiento de la red.

3.2.1. Simulador de radio

El simulador de radio-frecuencia de terreno irregular permite situar los nodos de la red sobre un mapa cartográfico con elevaciones del terreno (lo que permite obtener las líneas de vista). Debe permitir, además, definir todos los parámetros relevantes relacionados con la transmisión (frecuencia, potencia de transmisión, etc).

3.2.2. Datos de salida

La salida del simulador radio-eléctrico debe contener información sobre la red: nodos, enlaces y visibilidad entre nodos.

3.2.3. Lector de datos

El tercer bloque es el adaptador software, encargado de leer la salida del simulador de radio y procesarla para generar un fichero con la información necesaria para la creación de la red en el simulador.

3.2.4. Generación del script del simulador de red

A partir de la descripción de la red, se genera un script principal de simulación -que se ejecuta sobre la capa superior que sea implementado sobre el simulador de red- incluyendo el escenario de tráfico (nodo origen/destino de cada flujo, tasa, tiempo de inicio, duración y tipo de tráfico).

3.2.5. Capa superior del simulador de red

Para que la simulación en el simulador de eventos discretos se pueda lanzar desde un script principal lo más simple posible, hay que generar una capa intermedia que lo posibilite. Esto permite la automatización de los pasos de la ejecución. Se puede interpretar como un *helper* construida ad-hoc para el contexto objetivo.

3.2.6. Simulador de red

El simulador de red de eventos discretos debe ejecutar el script ,integrada en esa capa superior, y guardar la información relevante (en forma de trazas) para la evaluación posterior de la red.

3.2.7. Resultados

Además de usar herramientas especializadas en lectura de trazas de red (*tcpdump*, *wireshark*), es muy útil ofrecer resultados gráficos y/o numéricos de los parámetros que mejor describan el rendimiento de la red. De entre ellos nos interesarán especialmente el caudal (*throughput*) y el retardo de paquetes.

3.2.8. Realimentación

Una vez llegado al fin de la cadena de la herramienta de planificación de redes evaluaremos si los resultados se ajustan a lo esperado. En el caso que no sea así será necesario estudiar modificaciones en algún punto de la cadena (nodos con cobertura, posición de repetidores, tipo de modulación en enlaces, etc).

Evaluación de posibles componentes de la arquitectura

En este capítulo se evalúan por un lado distintos simuladores de radio y por otro simuladores de red. Hay que tener en cuenta que esta evaluación se llevó a cabo en la fase inicial del proyecto y que finalizó en marzo del año pasado. A día de hoy se sigue pensando que la elección de programas realizada han sido las más convenientes.

4.1. Simuladores de enlaces de radio

4.1.1. Introducción

Los dos planificadores de red libres/gratuitos que se analizan en este apartado son SPLAT y Radio Mobile. Ambos programas trabajan en el rango de frecuencias 20MHz - 20GHz y están basados en el modelo de propagación sobre terreno irregular Longley-Rice.

Radio Mobile [11] fue desarrollado por un radioaficionado (Roger Coudé) y funciona únicamente con el sistema operativo Microsoft Windows, (aunque la implementación libre de Windows Wine [72] permite ejecutarlo en sistemas UNIX). La versión usada en este estudio es la 9.6.5, disponible desde enero del 2009. Radio Mobile es un programa gratuito (incluso para uso comercial) pero no está licenciado como software libre. Además, el código (Visual Basic, sólo disponible para plataformas Microsoft) no está disponible, así que no es posible estudiarlo ni modificarlo.

Por su parte, SPLAT (Signal Propagation, Loss, And Terrain) fue creado por John A. Magliacane para sistemas operativos GNU/Linux, también existe una versión adaptada para ejecutarse

en Windows. La última versión disponible en la página web oficial es la 1.2.3 de octubre de 2008. A diferencia de Radio Mobile, la distribución o modificación está permitida bajo los términos de la licencia GNU/GPL.

La comparación se establecerá en torno a tres puntos: los datos de entrada, las operaciones que se pueden realizar con ellos y los archivos de salida.

4.1.2. Datos de entrada

En este apartado se describen los datos que pueden ser introducidos para definir las características del enlace o de la red bajo análisis. También se comentan los archivos de entrada con los que puede trabajar cada herramienta.

Datos de entrada en Radio Mobile

En Radio Mobile todas las operaciones se realizan a través de su interfaz gráfico. Los datos que requiere el programa se pueden dividir en dos grupos: por un lado los datos sobre las elevaciones del terreno y por otro los datos sobre la configuración de la red. Radio Mobile soporta varios formatos de mapas: SRTM 1 y 3 (Shuttle Radar Topography Mission); DTED 0, 1 y 2 (Digital Terrain Elevation Data); GTOPO30; GLOBE y BIL.

Los datos sobre la configuración de la red incluyen los emplazamientos de cada estación (unidad de la red) y las características de la red y de los sistemas que se instalan en dicha estación. La posición de las unidades o nodos se puede introducir en forma de coordenadas, seleccionando un punto del mapa con el ratón o extrayendo sus coordenadas de un fichero previamente creado. Las características que definen un sistema son:

- Potencia de transmisión
- Sensibilidad del receptor
- Pérdidas de línea
- Ganancia de la antena
- Altura de la antena
- Pérdidas adicionales del cable
- Frecuencia

- Tipo de antena

Radio Mobile permite definir múltiples sistemas y emplear el mismo sistema en distintos emplazamientos. También se pueden definir distintas redes, que a su vez constarán de dos o más unidades. Para cada red Radio Mobile permite escoger entre tres topologías:

- *Voice net*: para una red de voz.
- *Data net, Star topology (Master / Slave)*: para una red jerárquica donde una estación maestra se comunica con una o varias esclavas. Es la topología que se seleccionaría para analizar una red WiMAX PMP (Point-to-Multipoint). Las unidades esclavas no pueden comunicarse entre sí directamente, sino que deben hacerlo a través de la unidad maestra.
- *Data net, cluster (Node / Terminal)*: cada unidad puede comunicarse con cualquier otra unidad vecina.

Tanto los datos de las redes, de los sistemas, como de las unidades, se pueden exportar y guardar en ficheros. Además los diagramas de radiación de las antenas también se incluyen en el parámetro tipo de antena. Radio Mobile puede obtener información de archivos de localización de ciudades y cartografía.

Datos de entrada en SPLAT

En SPLAT las operaciones se realizan a través de la línea de comandos, mientras que los datos de entrada se introducen mediante ficheros de texto. No obstante, existe una aplicación web [66] que permite acceder a algunas funcionalidades a través de un interfaz gráfico y que también puede ser descargado gratuitamente.

SPLAT lee los datos necesarios desde archivos ASCII. Los mapas deben estar en formato SDF, aunque incluye herramientas para convertir mapas desde formato DEM (Digital Elevation Model) o SRTM-3 a formato SDF.

La información sobre la localización de cada nodo debe ser introducida en un fichero de texto conteniendo el nombre de la estación, su latitud, su longitud y la altura de la antena sobre el nivel del suelo (AGL). Los parámetros del modelo Longley-Rice se introducen también mediante un fichero de texto, donde además de los parámetros del modelo se puede especificar la ERP (Effective Radiated Power) en vatios de forma opcional.

SPLAT admite archivos opcionales de localización de ciudades, límites cartográficos, archivos de terreno definidos por el usuario, archivos de pérdidas de trayectoria, de patrones de radiación de antenas y archivos de definición de color. Los diagramas de radiación de las antenas también se pueden incluir en el diseño.

Para emplear el interfaz web de SPLAT es necesario registrar previamente cada nodo introduciendo su nombre, sus coordenadas, la altura de la antena y el continente donde se encuentra.

4.1.3. Operaciones

En este apartado se describen las operaciones más importantes que pueden ser realizadas con cada herramienta.

Opciones de representación de Radio Mobile

Radio Mobile soporta numerosas opciones para modificar la visualización de los mapas:

- GRAY SCALE SLOPE
- COLORED SLOPE (ABSOLUTE)
- COLORED SLOPE (RELATIVE)
- X-RAY
- X-RAY (INVERTED)
- RAINBOW

La diferencia entre unas y otras es la gama de colores que emplean, desde una escala de grises básica (GRAY SCALE SLOPE) hasta la opción RAINBOW que es la que proporciona mayor precisión con una gama de colores más amplia.

Sobre el mapa del terreno se pueden representar las unidades de la red y los enlaces definidos entre las distintas unidades, definiendo distintos colores en función del margen de desvanecimiento. Además Radio Mobile permite dibujar las curvas de nivel sobre el mapa con intervalos de 10, 100 ó 500 m. También se pueden combinar los mapas de elevación del terreno con mapas geográficos o políticos obtenidos de internet, lo que permite representar elementos como lagos, carreteras o ciudades.

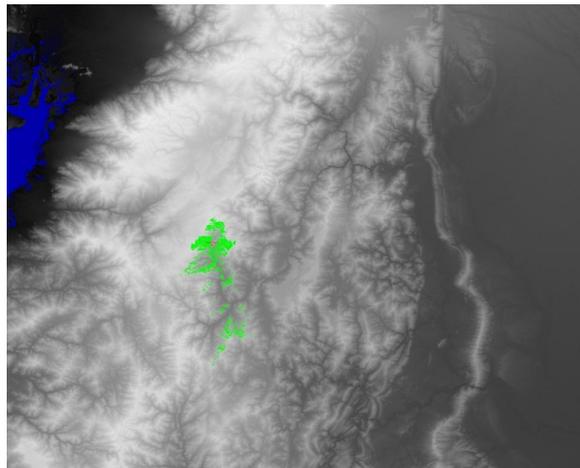


Figura 4.1: Mapa de cobertura generado con SPLAT.

Opciones de representación de SPLAT

SPLAT ofrece la posibilidad de representar varios parámetros del enlace en función de la distancia. Para generar los gráficos SPLAT invoca al programa gnuplot. La extensión del nombre del archivo especificado a SPLAT determinará el formato del gráfico generado (PNG, postscript, GIF, Adobe, AutoCAD, LaTeX, etc). Más adelante se ven los distintos parámetros que se pueden representar.

También es posible generar mapas de cobertura donde se representa la intensidad de la señal o las pérdidas de trayecto en cada punto mediante una escala de colores. También se pueden mostrar de este modo las zonas donde la primera Zona de Fresnel tenga un despejamiento determinado.

SPLAT permite además generar un mapa topográfico de una determinada región sin incluir áreas de cobertura o trayectorias de los enlaces, ilustrando simplemente las posiciones de los nodos. El mapa se puede centrar en torno a una posición con un radio determinado.

Mediante el interfaz web es posible ver el mapa de cobertura (según las pérdidas de trayecto, sin tener en cuenta la potencia de transmisión, ver Figura 4.1) de hasta cuatro estaciones, el perfil del terreno y las pérdidas de trayecto en función de la distancia entre dos estaciones y un mapa topográfico con las estaciones (aunque los enlaces no se dibujan).

Funciones de análisis y diseño de Radio Mobile

Con la información introducida sobre los equipos (sistemas) Radio Mobile calcula y representa el área de cobertura de una determinada estación (ver Figura 4.2). Para representar la cobertura,

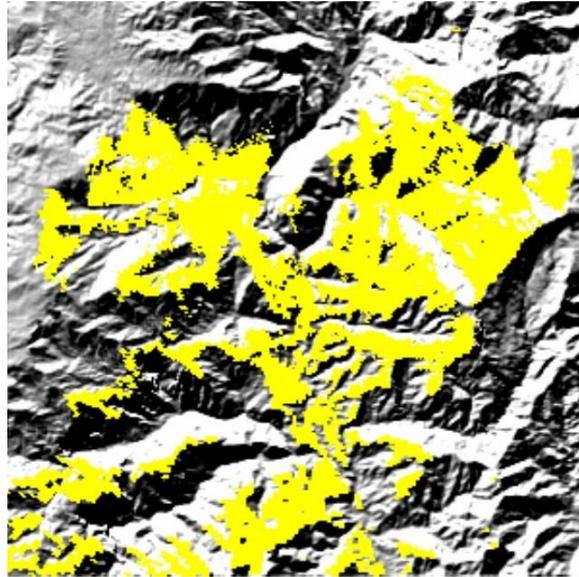


Figura 4.2: Mapa de cobertura generado con Radio Mobile.

Radio Mobile asigna colores diferentes a distintos rangos de señal recibida. La posibilidad de representar el terreno en escala de grises es interesante cuando se pretende utilizar esta opción ya que facilita la visualización. Para calcular la cobertura, Radio Mobile ofrece dos técnicas diferentes: *Single Polar* y *Combined Cartesian*. *Single Polar* utiliza un algoritmo de cálculo más rápido pero proporciona menor resolución frente a *Combined Cartesians* que puede dibujar la cobertura de más de una estación.

Una función similar a la del cálculo de coberturas permite representar las áreas del mapa donde la primera Zona de Fresnel está despejada. También se puede estudiar la interferencia entre dos estaciones a partir de las sensibilidades de los equipos y el margen de interferencia, representando las zonas donde la interferencia es tolerable.

Otra funcionalidad permite encontrar los puntos de mayor y menor altitud dentro de un área determinada. Todo esto puede ser útil a la hora de seleccionar los emplazamientos de las unidades. Radio Mobile ofrece también una herramienta para analizar las características de un enlace punto a punto y que muestra los siguientes parámetros del enlace:

- *Azimuth*: azimut de la antena desde el transmisor al receptor.
- *Pathloss*: pérdidas de trayecto en dB.
- *Elevation Angle*: ángulo con el que la señal sale de la antena transmisora, que es interesante



Figura 4.3: Perfil del terreno con Radio Mobile.

para cálculos de interferencia.

- *E-field*: nivel de señal en $dB\mu V/m$.
- *Obstruction*: calcula las pérdidas que introduce la primera obstrucción.
- *Receive Level (dBm)*: señal recibida calculada en dBm.
- *Worst Fresnel*: el despejamiento más bajo de la Zona de Fresnel en toda la trayectoria y la Zona de Fresnel a la que se refiere.
- *Received Level (μV)*: señal recibida en μV .
- *Distance*: distancia entre transmisor y receptor en kilómetros.
- *Rx (relative)*: señal recibida por encima del umbral del receptor, que equivale al margen de desvanecimiento.
- *Urban*: pérdidas del entorno urbano.
- *Forest*: pérdidas por vegetación.

Junto con los parámetros anteriormente mencionados, Radio Mobile muestra un perfil del terreno junto con la primera Zona de Fresnel, tal y como se muestra en la Figura 4.3.

A la hora de calcular el balance del enlace, Radio Mobile ofrece también la posibilidad de considerar los datos de la vegetación del terreno activando la opción de *Land Cover*.

Otras opciones de Radio Mobile que facilitan el proceso de adquisición de información son:

- *GPS*: configura la adquisición de información geográfica vía GPS.

- APRS: configura la adquisición de información del *Automatic Position Reporting System*.
- INTERNET: opción utilizada durante la configuración del sistema para permitir la descarga de archivos SRTM y Toporama, procedentes de Internet.

Funciones de análisis y diseño de SPLAT

SPLAT, por su parte, se invoca a través de la línea de comandos. El programa permite operar en modos punto a punto o en modo de predicción del área de cobertura. Además el análisis se puede considerar el modo de línea de vista (LOS) *Line Of Sight* o el modelo de propagación sobre terreno irregular (ITM) Longley-Rice. En el caso del modo LOS el usuario puede especificar el radio de curvatura de la tierra que se desee considerar.

SPLAT puede emplearse para determinar si existe línea de vista en un enlace entre dos puntos. Como resultado genera un informe en un archivo `.txt` en el que se recogen las posiciones del transmisor, del receptor y de cualquier obstrucción detectada a lo largo de la trayectoria de línea de vista. En caso de que no exista línea de vista, SPLAT calcula la altura mínima de las antenas para que ésta se verifique. Este archivo de texto también se puede generar a través del interfaz web.

Al analizar la cobertura de una determinada región, SPLAT genera un informe para cada estación analizada que contiene las coordenadas de cada punto, su altura sobre el nivel del mar, la altura de la antena sobre el terreno y la altura del promedio del terreno calculada en las direcciones de los azimut. SPLAT permite representar la evolución de ciertos parámetros con la distancia en un enlace punto a punto. Los gráficos que se pueden generar son:

- El perfil del terreno en función de la distancia, partiendo desde el receptor.
- Los ángulos de elevación y depresión entre receptor y transmisor desde la perspectiva del receptor. Un segundo trazo es dibujado desde el receptor al transmisor (de izquierda a derecha). Este trazo ilustra el ángulo de elevación requerido para que exista una trayectoria con línea de vista entre receptor y transmisor. Si la traza intersecta el perfil de elevación en cualquier punto del gráfico, se considera que bajo las condiciones dadas no existe una trayectoria con línea de vista.
- La altura del terreno tomando como referencia la trayectoria de línea de vista entre el transmisor y el receptor.

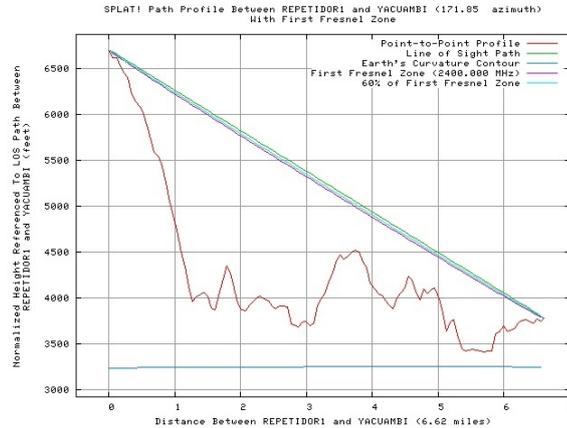


Figura 4.4: Perfil del terreno con SPLAT.

- La altura del terreno normalizada a las alturas de las antenas del transmisor y receptor, junto con la curvatura de la Tierra. Además, se puede representar la Zona de Fresnel que se desee.
- Las pérdidas de trayecto según el modelo Longley-Rice.

También se puede emplear SPLAT para generar un mapa topográfico que muestre la trayectoria entre el transmisor y el receptor, pudiendo definir hasta cuatro emplazamientos. Estos mapas representan las elevaciones usando una escala de grises logarítmica, asociando los puntos más altos con las capas más brillantes de gris y empleando el color azul para los puntos que están a nivel del mar. Además sobre este mapa SPLAT dibuja los enlaces entre dos puntos cuando no existen obstáculos. Estos mapas se pueden completar con información de nombres y emplazamientos de ciudades, torres, u otros lugares significativos. Lo mismo se pueda hacer con límites de ciudades o estados.

SPLAT puede predecir la cobertura que un transmisor puede proporcionar a varios emplazamientos, generando un mapa topográfico representando la línea de vista de cada punto basándose en las coordenadas de cada sitio y en la altura de la antena receptora. También puede mostrar las áreas de cobertura LOS para un máximo de cuatro transmisores separados sobre un mapa topográfico común. Por último se puede generar un mapa multicolor de pérdidas de trayectorias Longley-Rice, que ilustra los niveles de señal esperados en las áreas en torno al transmisor.

4.1.4. Archivos de salida

Archivos de salida de Radio Mobile

Las unidades se pueden exportar, almacenando entre otros los siguientes datos: el nombre de unidad, latitud/longitud y elevación. Los datos sobre los sistemas se pueden almacenar en un archivo para ser compartidos y utilizados en otras redes. Además se puede generar un archivo de texto `report.txt` 5.2.1 que contiene la matriz de visibilidad entre las estaciones para cada red.

Archivos de salida de SPLAT

Con cada operación que realiza, SPLAT genera un fichero de texto en el que recoge todos los parámetros del enlace con los que trabaja. El análisis de cobertura Longley-Rice puede consumir mucho tiempo, especialmente si el análisis es repetido varias veces para evaluar la influencia de distintos parámetros. Para acelerar este proceso se puede exportar los datos de las pérdidas de trayecto en cada punto a un fichero de salida. Sobre este fichero se realizan las modificaciones que se deseen para después importar de nuevo los datos de forma que no sea necesario recalcular las pérdidas y la generación del mapa sea más rápida. Los ficheros de salida por pérdidas de trayecto SPLAT pueden exceder los 100 MBytes. Contienen la información referente a los límites de la región que describen, latitudes, longitudes, azimut, elevaciones y pérdidas de trayecto (dB) para una serie de puntos específicos sobre la región que rodea al transmisor.

Los mapas de cobertura y de pérdidas de trayecto son compatibles con el programa `Xastir` (X Amateur Station Tracking and Information Reporting) si se emplea la opción de SPLAT que permite generar un archivo de geo-referencia.

Los ficheros KML (Keyhole Markup Language) compatibles con `Google Earth` pueden ser generados por SPLAT cuando se realizan análisis punto a punto.

4.1.5. Conclusiones

Según lo visto en este capítulo, tanto Radio Mobile como SPLAT son herramientas muy potentes y ambas podrían servir -desde el punto de vista técnico- para el propósito del proyecto. Los aspectos que decantan la elección por **Radio Mobile** son, por una parte, que permite simular fácilmente, en un escenario único, varias sub-redes con topologías complejas (en SPLAT es necesario crear estas sub-redes por separado); en segundo lugar, Radio Mobile dispone de un

interfaz gráfico muchísimo más completo y versátil, lo que posibilita diseñar redes de una forma más visual e intuitiva a usuarios con conocimientos técnicos medios.

El mayor inconveniente de Radio Mobile es, sin duda, que no está licenciado como software libre (a diferencia de SPLAT, que es GNU/GPL). De hecho, ni siquiera el código es accesible, lo que imposibilita estudiar cómo funciona (sería especialmente interesante estudiar los modelos de propagación que aplica) o llevar a cabo modificaciones.

Aunque en este caso haya que sacrificar las trabas de la licencia y disponibilidad de código a cambio de la funcionalidad que proporciona, sería aconsejable seguir la evolución de SPLAT (especialmente del interfaz gráfico) para comprobar si en algún momento ofrece las prestaciones mínimas para sustituir a Radio Mobile.

4.2. Simuladores de red

4.2.1. Introducción

Existe un gran número de simuladores de red disponibles. De entre ellos veremos los que son de uso libre y gratuito (al menos para fines académicos), con una especial atención a los cuatro que se ajustan mejor a las características del proyecto (NCTUns, OMNeT++, ns-2 y ns-3). En este estudio no se tomarán en consideración programas privativos (tales como OPNET, QualNet o Shunra), puesto que el código fuente no está disponible y es imposible tanto la validación de sus modelos como la creación y modificación del código.

Las aplicaciones que se evalúan, son todos simuladores de eventos discretos que representan a un sistema como una secuencia cronológica de eventos. Cada uno de estos eventos, que sucede en un momento determinado, marca un cambio de estado en el sistema (un ejemplo de evento es el envío de un paquete). Durante la simulación se generan un conjunto de ficheros que una vez procesados permiten extraer parámetros para estimar las prestaciones de la red; tales como el *throughput* -tasa de transmisión- entre estaciones, retardo, pérdida de paquetes, etc.

4.2.2. Requisitos

El software de simulación de red que se necesita debe cumplir todos o la mayor parte de los siguientes requisitos. Si alguna de las características no está disponible, se discutirá la posibilidad de implementarla.

Licencia

Cualquier licencia de software libre [29]. Se aceptan excepcionalmente licencias académicas, es decir, aquellas libres excepto para fines comerciales (cabe notar que, bajo estas restricciones, estas aplicaciones no se consideran software libre)

Sistema operativo

Preferiblemente multiplataforma, aunque el soporte para sistemas operativos libres (en especial GNU/Linux) es un requisito indispensable. Excepcionalmente se aceptan simuladores que funcionen a través de plataformas (no emuladas) como Wine.

Protocolos inalámbricos

Debe soportar los protocolos WiFi más comunes (802.11 a/b/g), WiFi con QoS (calidad de servicio) 802.11e y WiMAX 802.16-2004 (imprescindible soporte para redes Mesh y deseable para PMP (Punto-multi-punto))

Nodos multi-interfaz

Los nodos de cualquier red, por básica que ésta sea, necesitan routers con varios interfaces, así que esta opción debe estar soportada por el simulador, sino es de forma directa, al menos permitiendo la creación de subnodos virtuales cableados (comprobando en tal caso que no se introducen distorsiones en las conexiones cableadas).

Encaminamiento

Ligado al soporte de nodos multi-interfaz, el simulador debe permitir la creación de redes con topologías complejas, con encaminamiento configurable entre interfaces y nodos.

Nivel físico configurable

Los simuladores de redes incorporan habitualmente sus propios modelos físicos de propagación. Esto supone una ventaja a la hora de montar redes sencillas y ver en una primera aproximación su comportamiento, pero en redes más complejas, en las que hay que tener en cuenta la orografía y modelos de propagación más sofisticados, es necesario usar otras aplicaciones especializadas (como son por ejemplo Radio Mobile o SPLAT evaluados en el apartado 4.1). Debe tener

las posibilidad, por tanto, de usar la información extraída del planificador RF en el simulador de red. Entre otros aspectos:

Pérdida de paquetes El simulador debe contemplar la tasa de error de bit (BER: Bit Error Rate) que se traduce en una tasa de pérdida de paquetes (FER: Frame Error Rate)

SNR externo La calidad de un enlace se suele medir mediante la relación señal a ruido (SNR: Signal to Noise Ratio). El simulador de red debe tener alguna forma de desactivar su propios modelos de propagación inalámbricos y usar la información (normalmente en forma de SNR) calculada por el planificador de radio frecuencia (RF: Radio Frequency).

Cálculo de la BER externo En una aproximación simplificada el cálculo de la BER puede hacerse externamente (a partir de los datos del planificador RF).

Cálculo de la BER en simulador Debido a la naturaleza de los protocolos WiFi y WiMAX, una aproximación como la propuesta anteriormente se ajusta poco a la realidad. El protocolo 802.11a, por ejemplo, usa una OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) en el que las portadoras cambian de modulación en función de la velocidad del enlace (que a su vez se ajusta a la calidad del canal), así que la BER cambia a pesar de que el SNR se mantenga constante.

Posibilidad de aislamiento entre estaciones El simulador, en función de la información preparada en el planificador RF, debe tener en cuenta que hay estaciones sin visibilidad. Esto debería traducirse tanto en una mejora de la fidelidad de los resultados como en una reducción del tiempo de simulación.

Soporte para larga distancia en 802.11 El uso del estándar WiFi 802.11 en enlaces de larga distancia requiere, al menos, que los parámetro `ACKTimeout` (el tiempo que espera una estación el asentimiento (ACK) antes de dar por perdido un paquete enviado) y el `SlotTime` (el que determina la unidad mínima de espera en el protocolo de contienda CSMA/CA) sean configurables.

Simulaciones distribuidas

No es un requisito imprescindible, pero se valorará que el simulador de red permita simular de forma paralela (en diferentes máquinas), para agilizar simulaciones complejas.

Uso de protocolos/simulaciones reales

La práctica totalidad de simuladores, por razones comprensibles de integración, implementan los protocolos de cero. Esto introduce distorsiones que, en menor o mayor medida, influyen en la precisión de los resultados. Además, y esto es todavía más importante, hace imposible el uso a través de las redes simuladas de aplicaciones reales.

Esto supone la imposibilidad de facto de estimar las prestaciones de aplicaciones reales, y que haya que limitarse a trabajar con aplicaciones muy simplificadas (normalmente incluidas en el propio simulador). Se valorará la posibilidad de usar implementaciones reales de protocolos (normalmente TCP y UDP) y que las aplicaciones puedan correr sobre redes simuladas sin modificación de ningún tipo.

Modo de emulación

Aunque no es propiamente una funcionalidad que se deba esperar de un simulador de red, se valorará la posibilidad de emplearlo en modo emulación. Un emulador de red permite que dispositivos reales interactúen a través de la red simulada. De esta forma es posible evaluar las prestaciones de aplicaciones que necesitan valoración empírica (por ejemplo: la calidad de una comunicación de voz por VoIP)

Modo de comandos/GUI

Se valorarán ambos aspectos, que la aplicación tenga un soporte en modo comando potente (lo que incluye su extensión con scripts), pero también que disponga de un interfaz de usuario amigable para la creación rápida e intuitiva de redes y el lanzamiento de simulaciones.

Comunidad y estado del proyecto

Un proyecto de software se valora, además de por sus características objetivas, por su nivel de actividad, esto es, por la existencia de una comunidad de usuarios y desarrolladores que a su alrededor creen nuevos módulos, tutoriales, reportes de problemas, propuestas de mejora, etc. Se

valorará también que el simulador se haya estudiado o utilizado en artículos en revistas científicas del IEEE.

4.2.3. Evaluación de simuladores

A continuación se evalúan los diferentes simuladores de red de uno a uno, profundizados en función del atractivo de cada. En función de los requisitos previamente mencionados los simuladores seleccionados se listan: GloMoSim, J-Sim, GTNetS, JIST/SWANS, SSFNet, NCTUns, OMNeT++, ns-2 y ns-3.

4.2.4. GloMoSim

GloMoSim [28] es un entorno de simulación para redes inalámbricas con licencia académica (no es software libre). Está programado en Parsec, un lenguaje basado en C especialmente diseñado para la simulación de eventos discretos en redes de comunicación de gran escala (soporta miles de nodos).

Este simulador se descarta por diversas razones, principalmente porque su desarrollo está completamente detenido (la última versión estable data de diciembre de 2000). Aparentemente su desarrollador original (Rajive Bagrodia, UCLA) se ha volcado en la versión propietaria de GloMoSim (QualNet) a través de la empresa SNT (Scalable Network Technologies), programa del que sí se lanzan nuevas versiones periódicamente.

En el punto en que quedó el desarrollo original GloMoSim tenía un soporte muy limitado de protocolos WiFi (únicamente código para 802.11b en modo ad-hoc, aunque existe documentación sobre la implementación de un modo infraestructura [10] y soporte para 802.11e [23]). Tampoco se ha encontrado código que implemente ningún protocolo WiMAX (aunque sí existe un estudio [7], sin código disponible).

4.2.5. J-Sim

J-Sim [36] (anteriormente conocido como JavaSim) es un entorno de simulación basado en componentes. El núcleo está programado en Java y usa el lenguaje de scripting TCL para la definición de escenarios y simulaciones.

A pesar de contar con un buen diseño, flexible y extensible, J-Sim se descarta por su pobre soporte para protocolos inalámbricos (sólo incluye una versión básica del MAC 802.11, ninguno

de los estándares para nivel físico). Además, su desarrollo se encuentra aparentemente detenido, ya que su última versión estable data de febrero de 2004.

4.2.6. GTNetS

Georgia Tech Network Simulator [68] es un simulador bajo licencia BSD (software libre) desarrollado en C++. Esta aplicación se ha usado tradicionalmente para el diseño de topologías de gran escala y con gran número de nodos (por ejemplo, redes de sensores).

Se descarta por el limitado soporte de protocolos WiFi (únicamente 802.11b) y la falta completa de soporte para WiMAX. Además, tiene una comunidad de usuarios muy reducida, no hay listas de correo ni acceso libre al repositorio de código.

4.2.7. JIST/SWANS

SWANS (Scalable Wireless Ad-hoc Network Simulator) [70], es un simulador construido sobre JIST (Java in Simulation Time) especialmente diseñado para grande redes de sensores.

Como su nombre indica, SWANS ha sido diseñado para la simulación de redes ad-hoc, y no se ha hecho ninguna implementación (ni parece estar prevista) para el modo infraestructura. Además, por el momento sólo soporta el estándar 802.11b, no se ha encontrado información sobre implementación del resto de estándares WiFi ni nada para WiMAX. Por todas estas razones, se descarta su uso.

4.2.8. SSFNet

SSFNet [67] comprende un conjunto de modelos de red programados en Java sobre la plataforma de simulación SSF (Scalable Simulation Framework).

SSFNet no es una aplicación pensada para redes inalámbricas, de hecho no se han encontrado ningún modelo para los estándares 802.11. Este hecho es suficiente para excluirlo de la lista de simuladores candidatos. Asimismo, el desarrollo parece detenido (la última versión estable, 2.0, es de 2004) y la lista de correo no tiene tráfico significativo desde hace meses.

4.2.9. NCTUns

NCTUns [43] es un simulador y emulador de redes cableadas e inalámbricas desarrollado en la University of NCTU (National Chiao Tung University) de Taiwan, comercializado y apoyado

por SimReal Inc. (empresa virtual fundada en 2002 con el fin de promover el uso de NCTUns).

Por las características y especificaciones del simulador (muy completas) se hará un estudio en profundidad del mismo.

Análisis

Licencia: Se puede usar, copiar, modificar y distribuir para usos no comerciales o lucrativos. No es por tanto software libre.

Sistema operativo: Fedora Linux 9. Es posible instalarlo en otras distribuciones de Linux con mayor o menor esfuerzo. Ver por ejemplo el proceso de instalación en sistemas Debian/Ubuntu [64].

Código: C++ (258k líneas de código en la versión 5.0)

Protocolos inalámbricos: 802.11a infraestructura AP/cliente, 802.11a ad-hoc, 802.11b infraestructura AP/cliente, 802.11b ad-hoc, 802.11e, 802.11p, 802.11d (Mesh y PMP), 802.16e, GPRS (General Packet Radio Service) y DVB-RCST (Digital Video Broadcast - Return Channel Satellite Terminal). Soporta todos los protocolos en los que estamos interesados excepto 802.11g. En la lista de correo se ha hecho alguna consulta [27] al respecto en 2006, pero no ha habido avances desde entonces. Sería, pues, necesario un desarrollo propio del protocolo.

Nodos multi-interfaz: Están soportados sólo para nodos móviles. Estos pueden incluir un número arbitrario de interfaces de hasta 8 tipos distintos: 802.11a infraestructura cliente, 802.11a ad-hoc, 802.11b infraestructura cliente, 802.11b ad-hoc, 802.11p, 802.16e, GPRS y DVB-RCST. Nótese que los modos 802.11e y 802.16e no están disponible en nodos multi-interfaz y que sólo están habilitados los modos usados por clientes (un interfaz en modo AP no puede formar parte de un nodo multi-interfaz).

Encaminamiento: Las topologías que se pueden crear son muy limitadas. Un escenario típico, como es un nodo con un interfaz en modo infraestructura managed (cliente) y otro en master (servidor) no puede simularse, ya que no hay forma de intercomunicar ambos interfaces. Esto es así porque un nodo managed se considera móvil, y por tanto no puede conectarse a ningún otro nodo excepto a su punto de acceso (AP: Access Point) por vía inalámbrica). Como ya ha visto

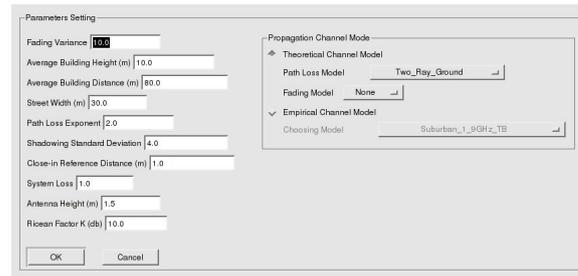


Figura 4.5: Modelo de canal con NCTUns.

en el apartado anterior, los nodos multi-interfaz no pueden usarse porque sólo están soportados en nodos móviles (que no pueden funcionar en modo master). La solución propuesta [40] por sus autores pasa por hacer el *bridging* a nivel 5 (sockets), opción poco atractiva, ya que la estructura de la red no queda reflejada en la topología.

Nivel físico configurable: En los interfaces inalámbricos las características del canal son configurables, tal y como se muestra en la Figura 4.5.

Pérdida de paquetes: Soportada, la BER se calcula a partir de los parámetros del modelo de canal.

SNR/BER externo: No existe esta opción. Sería necesario implementar un tercer modo de canal en que la SNR se estableciera por una matriz proporcionada externamente. Nótese que NCTUns es un simulador en que los nodos móviles juegan un papel importante, así que una matriz de potencias fija no tiene fácil encaje en sus escenarios habituales.

Posibilidad de aislamiento entre estaciones: Existe un objeto obstáculo para atenuar o eliminar completamente la señal entre nodos, tal y como se muestra en la Figura 4.6.

Soporte para larga distancia en 802.11: `ACKTimeout` y `SlotTime` son parámetros fijos en el código, no son configurables por el usuario.

Asignación de `ACKTimeout` en 802.11 DCF

```
#define ACK_Time(nid,pid)
(u_int32_t)(rintf(((phy_80211a*)InstanceLookup(
```

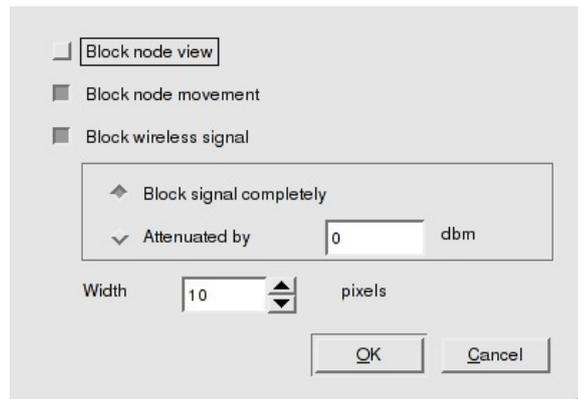


Figura 4.6: Obstáculos en NCTUns.

```

    nid,pid,"phy_80211a"))->TXTIME(MAC80211_ACK_LEN,*bw_)+0.5))
/*
 * IEEE 802.11 Spec, section 9.2.5.7
 * - After transmitting an RTS, a node waits CTSTimeout
 *   for a CTS.
 *
 * IEEE 802.11 Spec, section 9.2.8
 * - After transmitting an DATA, a node waits ACKTimeout
 *   for a ACK.
 *
 * IEEE 802.11 Spec, section 9.2.5.4
 * - After hearing an RTS, a node waits NAVTimeout
 *   before resetting its NAV.
 *
 */

#define ACKTimeout(len,nid,pid) (TX_Time(len,*bw_),nid,pid)
    + ACK_Time(nid,pid) + sifs+difs)

Asignación de SlotTime en 802.11 DCF

int mac802_11dcf::init_PHYMIB()
{
    phymib = (struct PHY_MIB *)malloc(sizeof(struct PHY_MIB));

```

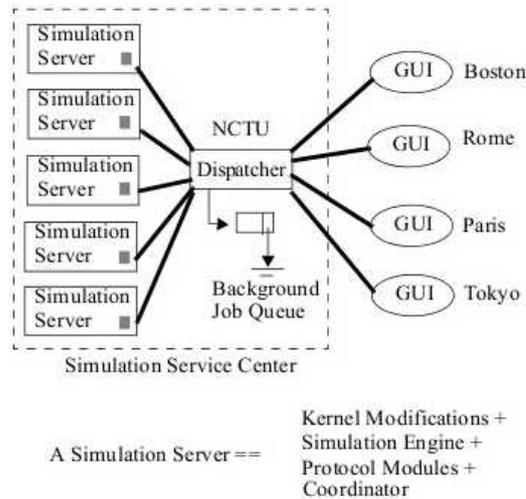


Figura 4.7: Arquitectura NCTUs.

```

assert(phymib);

/* IEEE 802.11 Spec, Page 237 */
phymib->aCWmin = 31;
phymib->aCWmax = 1023;
phymib->aSlotTime = 20;      /* 20 us */
phymib->aCCATime = 15;      /* 15 us */
phymib->aTxRxTurnaroundTime = 15; /* 15 us */
phymib->aSIFSTime = 10;     /* 10 us */
phymib->aPreambleLength = 144; /* 144 bits */
phymib->aPLCPHeaderLength = 48; /* 48 bits */

return(1);
}

```

Simulaciones distribuidas: Soportadas. El simulador está dividido en 3 partes, el GUI, el *dispatcher* y el coordinador. Cada una de las partes pueden correr en ordenadores distintos (y los coordinadores en tantas máquinas como se quiera). Un ejemplo de esta arquitectura se muestra en la Figura 4.7

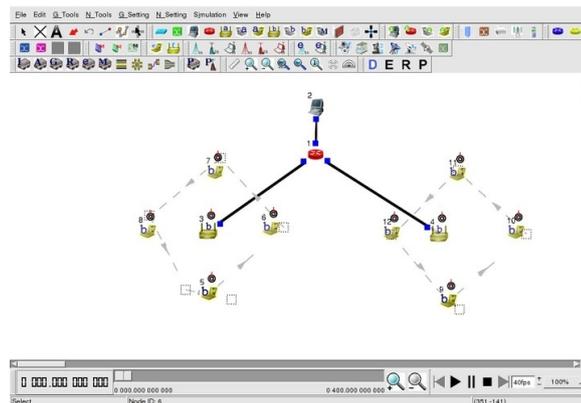


Figura 4.8: Ejemplo del entrono gráfico del NCTUns.

Uso de protocolos/simulaciones reales: Una de las características más destacables de NCTUns es que utiliza la pila de protocolos TCP/IP del propio sistema operativo. Esto asegura una mejor aproximación al comportamiento final de la red y el uso de aplicaciones ya existentes sobre las redes simuladas.

Modo de emulación: Está soportado. Para activarlo sólo hay que igualar el tiempo de simulación al tiempo real.

Modo de comandos/GUI: No tiene soporte por línea de comandos o scripting. La topología, configuración de nodos y simulación se inicia a través del interfaz gráfico. Un ejemplo se puede observar en la Figura 4.8. Dicho interfaz es bastante completo, pero es poco claro y tiene una distribución confusa de opciones y menús.

Comunidad y estado del proyecto Pese a que su primera versión estable data de 2002 y que todavía está en desarrollo (la última versión se liberó hace apenas unos meses), NCTUns no ha conseguido establecer una comunidad amplia de usuario y desarrolladores a su alrededor.

Última Versión Estable: versión 6.0 de septiembre de 2009.

Comunidad: no se han encontrados módulos para NCTUns hechos por desarrolladores externos. Google reporta (a día 02/03/2008) sólo 5.620 páginas relacionadas con el simulador. NCTUns dispone de una lista de discusión, pero con un volumen de correos muy bajo (10-20 mensajes por mes), en las que habitualmente las consultas quedan sin respuesta. El código en

desarrollo de NCTUns no está disponible a través de un repositorio (sólo las versiones estables son descargables). Publicaciones IEEE: 10 publicaciones (cuatro a cargo de los desarrolladores originales).

Valoración

NCTUns es un simulador muy interesante en varios aspectos. En primer lugar por implementar los protocolos de la familia WiFi más usados (excepto 802.11g) y WiMAX, incluyendo sus dos modos de funcionamiento (Mesh y PMP) para 802.11d. Por otra parte, el uso de la pila de protocolos del kernel del Linux y la posibilidad de utilizar aplicaciones reales a través de redes simuladas (incluso en modo emulación) es también una característica muy atractiva.

Entre los aspectos negativos destaca la rigidez de la herramienta: al estar orientada a su uso exclusivo mediante un GUI, es imposible cualquier ajuste que no esté disponible a través del interfaz gráfico. Como hemos visto, el encaminamiento entre interfaces trabajando en modos distintos (que no es posible a nivel de red) constituye también una limitación grave para redes de mediana complejidad.

El aspecto más negativo de NCTUns es, sin embargo, su pobre impacto en la comunidad tras casi ocho años de existencia. El simulador parece seguir un modelo cerrado de desarrollo (sorprende que el código no esté disponible en repositorios de acceso libre), lo que hace prever que las futuras modificaciones de la herramienta provengan únicamente de sus creadores.

4.2.10. OMNeT++

OMNeT++ [57] es una plataforma de simulación con una arquitectura modular y extensible, tan flexible que se utiliza en ámbitos tan diversos como el modelado de redes, protocolos, sistemas de colas, multiprocesadores o arquitecturas hardware. En general, es un simulador útil para cualquier tipo de sistema en que pueda modelarse por la simulación por eventos discretos y el intercambio de mensajes.

El simulador de red OMNeT++ tiene un diseño orientado a objetos, simple y modular, lo que le permite escalar bien en la simulación de grandes redes. La entidad base en OMNeT++ es el módulo, que puede ser atómico o compuesto por otros submódulos (hasta un nivel arbitrario de anidamiento), tal y como se muestra en la Figura 4.9. Los módulos se combinan para crear estructuras más complejas. La topología de una red se define con el lenguaje propio NED

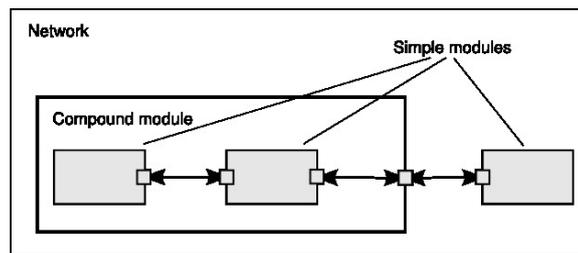


Figura 4.9: Arquitectura modular del OMNeT++.

(Network Description) y consta de definiciones de módulos, canales y redes.

Análisis

Aunque OMNeT++ no proporciona componentes específicos para la simulación de redes, existen entornos especializados *-frameworks-* desarrollados independientemente al núcleo y con sus propios ciclos de publicación. En el ámbito que nos interesan, los más destacables son INET [56], Mobility [63] e INETMANET [5]. Como sucede en otros simuladores libres, los esfuerzos no están del todo coordinados y dichos frameworks tienen código repetido o reimplementado. De estos frameworks, INETMANET es el más reciente e integra funcionalidad de los otros dos, así que será el estudiado en este análisis.

Licencia: OMNeT++ tiene una licencia propia a la que denomina *Academic Public License*, libre sólo para usos académicos (no es, por tanto, software libre). El framework INETMANET, por otro lado, sí es software libre, ya que sus componentes están licenciados bajo la GPL ó LGPL. Para usos no académicos existe Omnest [34], la versión comercial de OMNeT++.

Sistema operativo: GNU/Linux y Microsoft Windows (XP, Win2K).

Código: C++ (175k líneas de código en la versión 4.0) y NED (Network Description), lenguaje propio usada para la definir la topología de los módulos. Módulo INETMANET, C++ (193k líneas)

Protocolos inalámbricos: Implementados por entornos (frameworks) especializados. INETMANET (última versión de septiembre 2008) es una extensión de INET (cuya última versión es de octubre 2006).

WiFi: INETMANET soporta los protocolos 802.11a/b/g en modos ad-hoc e infraestructura, con algunas limitaciones: no hay soporte para fragmentación, control de potencia ni PCF (Point Coordination Function). Para 802.11e existe una implementación [55] muy limitada y que aparentemente no ha sido validada por la comunidad de OMNeT (no se cita en ninguna otro sitio). En cuanto al soporte para larga distancia en 802.11, ACKTimeout y SlotTime son parámetros fijos en el código.

WiMAX: No existe soporte para WiMAX excepto el que provee el proyecto Numbat [52], que implementa únicamente 802.16-2005(e) (nodos móviles).

Nodos multi-interfaz: Los canales inalámbricos se simulan a través del módulo `ChannelControl`. Este módulo está preparado para ser una instancia única, así que en cada simulación puede existir sólo un tipo de canal. Hay algunos proyectos que salvan esta limitación, como MiXiM [17] y Modified INET [69], que podrían servir de referencia.

Encaminamiento: INETMANET implementa los protocolos de encaminamiento dinámico AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing), DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector Routing), DSR (Dynamic Source Routing), DYMO (Dynamic MANET On-demand) y OLSR (Optimized Link State Routing).

Nivel físico configurable: El núcleo de la arquitectura de INETMANET es el módulo de control de canal (`ChannelControl`). Dependiendo de la distancia y de las características del nivel físico de ambos nodos, decide si éstos están en rango de comunicación o no. El único modelo de propagación implementado es el de espacio libre.

SNR/BER externo: No existe esta posibilidad, se tendría que modificar el módulo de control de canal.

Posibilidad de aislamiento entre estaciones: El módulo de control de canal define un SNR mínimo de interferencia. Por debajo de él el paquete se descarta. No está implementado ningún mecanismo de aislamiento completo entre estaciones.

Simulaciones distribuidas: Soportadas [59].

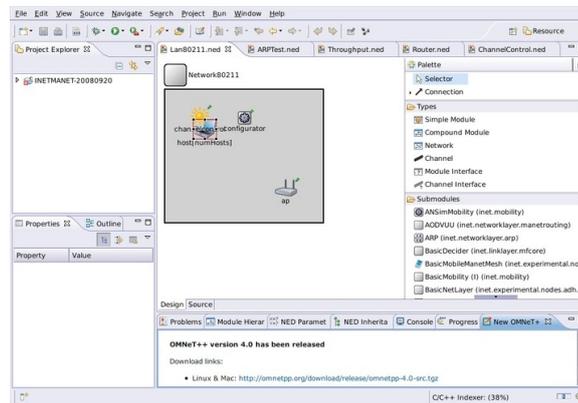


Figura 4.10: GUI de OMNET++.

Uso de protocolos/simulaciones reales: No está soportado. Recientemente se han propuesto (ver Mayer,Gamer 2008 [1]) para el interfaz con aplicaciones reales, pero según los propios autores es sólo posible para aplicaciones de complejidad reducida (además, es igualmente necesario crear una capa de interfaz). En cuanto al uso de protocolos reales, OppBSD [58] adapta el protocolo TCP/IP del kernel de FreeBSD a OMNeT. Con este proyecto, además, se pueden emular redes que interactúan con el nodos en el mundo real.

Modo comandos/GUI: Soporte completo a través de línea de comandos. Potente GUI basado en Eclipse con el que editar módulos (C++), ficheros NED y ficheros de simulación (INI). Asimismo las simulaciones se pueden lanzar en modo comando o mediante el interfaz gráfico, que se muestra en la Figura 4.10.

Comunidad y estado del proyecto Después de años de desarrollo (el proyecto se inició en 1992) OMNeT sigue mostrando una gran vitalidad y cuenta con una comunidad importante a su alrededor. Última versión estable: Versión 3.3 de octubre de 2008.

Comunidad: OMNeT++ es un simulador bastante popular en el mundo académico (especialmente en Alemania) debido a su versatilidad y extensibilidad, y dispone de una gran cantidad de documentación disponible en la red (wiki, tutoriales, etc.). Existen muchos módulos y desarrollos externos al proyecto (sólo en la página oficial están referenciados 41), aunque la descoordinación y la dispersión de esfuerzos es notoria. OMNeT++ dispone de 4 foros de discusión [58] con un volumen alto de mensajes. No ha sido posible encontrar un repositorio del código

base de OMNeT, pero sí del código de INETMANET, disponible en GitHub. Google reporta (a día de 31/03/2010) 146.000 páginas relacionadas con el simulador.

Publicaciones IEEE: 92 Publicaciones.

Valoración

OMNeT++ es indudablemente una potente herramienta de simulación, con un diseño modular, extensible y versátil que permite al usuario un control completo desde su entorno de programación (ya sea a través de ficheros NED o de módulos C++). Cuenta, además, con un completo soporte tanto por línea de comandos como a través del interfaz gráfico (este último sensiblemente mejorado en la última versión).

Entre los aspectos negativos hay que destacar que los frameworks existentes para la simulación de redes inalámbricas implementados sobre OMNeT son todavía limitados. Si bien los problemas de enrutamiento que hemos visto (que tienen su origen en la existencia de un único controlador de canal) serían enmendables, la implementación de los protocolos inalámbricos es todavía insuficiente: soporta 802.11 a/b/g (tanto en modo ad-hoc como infraestructura) pero no da soporte validado para 802.11e ni tampoco para 802.16-2004 (en ninguna de sus modalidades Mesh ó PMP).

4.2.11. ns-2

ns-2 es un simulador de eventos discretos extremadamente popular en el ámbito académico por su extensibilidad. Su desarrollo comenzó en 1989 a partir del simulador REAL, y hasta el día de hoy ha contado con soporte y financiación de diferentes entidades públicas y privadas (DARPA, Xerox, UCB, USC/ISI, SAMAN, CONSER, Sun, etc). ns-2 sigue una filosofía de desarrollo abierta, lo que ha contribuido decisivamente a su crecimiento, convirtiéndose en una de las herramientas más completas tanto en el estudio de redes cableadas como inalámbricas. Aunque se sigue trabajando en ns-2 y siguen apareciendo nuevas versiones, desde 2006 está en desarrollo paralelo la próxima gran versión (no compatible) del simulador, ns-3.

Análisis

Licencia: GNU General Public License (GPL) version 2 (software libre).

Sistema operativo: Sistemas POSIX como FreeBSD, GNU/Linux, SunOS, Solaris o Cygwin.

Código: Núcleo en C++ (437k líneas) e interfaz de usuario en OTcl (230k líneas). OTcl (Object Tcl) es una extensión de objetos para el lenguaje Tcl. Como capa de interfaz entre C++ Y OTcl se usa TclCL.

Protocolos inalámbricos:

WiFi Además del módulo CMU (la implementación tradicional de 802.11 en ns-2), la versión 2.33 incorpora dos nuevos módulos (que no lo complementan, sino que lo sustituyen por completo; el usuario debe elegir cuál de los tres utiliza):

CMU: Único existente hasta ns-2.33, el modelo desarrollado por la Carnegie Mellon University Implementa DCF (Distributed Coordination Function) y usa el esquema RTS/CTS/DATA/ACK para paquetes unicast y DATA para multicast. Según la opinión mayoritaria de la comunidad se trata de una implementación muy pobre, puesto que obvia muchos aspectos del estándar y lo simplifica hasta tal punto que compromete la fidelidad de los resultados. Entre las principales carencias destacan la falta de *beacons*, de paquetes de control, control de potencia de transmisión o asignación dinámica de canales. De igual forma, no se implementa la exploración de canales (scanning), asociación ni autenticación. Las dos últimas carencias han sido resueltas por Ilango Purushothaman para ns-2.33 y ahora se da un soporte mucho más completo para el modo infraestructura.

802.11Ext: Desarrollado por un equipo de Mercedes-Benz y de la universidad de Karlsruhe, implementa un nuevo 802.11 MAC y capa física (*Mac802_11Ext* y *WirelessPhyExt*). Entre otras características, el módulo presenta un diseño estructurado del MAC, el cálculo de la SINR (Signal-to-Interference Noise Ratio), soporte para múltiples modulaciones, control de pérdida de paquetes en capa física e implementación del modelo Nakagami [71] de atenuación (adecuado para largas distancias).

dei802mr: Derivada del módulo MCU, la implementación del DEI (Department of Information Engineering de la Universidad de Padua) incorpora modelos físicos con diferentes tasas de transmisión para 802.11b/g. Además lleva a cabo un cálculo más preciso del SINR, del PER

(Packet-Error-Rate) a partir de las curvas PER vs SINR vs el tamaño del paquete (proporcionadas para 802.11b/g y modificables por el usuario), la potencia de ruido es configurable en los scripts Tcl. Asimismo, la afectación entre nodos se puede limitar según la distancia entre los mismos. En las 3 implementaciones el valor `SlotTime` es un parámetro configurable desde los scripts Tcl, mientras que `ACKTimeout` es un valor fijo en el código C++. Sería necesario algún ajuste (aunque no debería ser complicado hacer que el parámetro fuera configurable desde Tcl).

En cuanto a la implementación de los diferentes estándares 802.11:

802.11a: Soportado por el módulo 802.11Ext.

802.11b/g: Soportados por el módulo `dei802mr` con velocidades variables (modo b: 1/2/5.5/11Mb, modo g: 6/9/12/18/24/36/48/54Mb)

802.11e: Los módulos oficiales de ns-2 no soportan el estándar. Se han encontrado diferentes implementaciones externas, aunque ninguna para la última versión de ns-2: El módulo de Claudio Casetti [8] implementa EDCF/HCF, pero su desarrollo está parado y sólo funciona hasta ns-2.29. Ni Qiang [61] de INRIA desarrolló en 2004 módulos para EDCF y Adaptive EDCF, pero no han sido actualizados y no funcionan en versiones recientes de ns-2. El proyecto Nshcca [49] de la Universidad de Pisa implementa HCCA (parche para versión 2.29). El proyecto de la Universidad técnica de Berlín [30] (parche para ns-2.28) da soporte básico para EDCA, aunque no implementa adaptación de velocidad, asociación, autenticación ni gestión de energía.

WiMAX 802.16-2004: Existen diversos módulos externos que dan soporte más o menos completo: `Ns2mesh80216` [50] es el módulo desarrollado por la Universidad de Pisa y el Georgia Institute of Technology para ns-2.33 que da soporte 802.16-2004 para redes Mesh (pero no para PMP). Implementa completamente la transmisión de datos en la capa MAC, el handshake de 3 vías descrito en el estándar y un planificador FEBA (Fair End-to-end bandwidth access). Según se advierte en las especificaciones, la capa MAC de este módulo no puede interoperar con los algoritmos de encaminamiento de ns-2 ni con los módulos de interferencia a nivel físico, así que el módulo contiene una clase propia de enrutado (OSPF) y modelado del canal inalámbrico. En este último modelo no es posible, a diferencia de las simulaciones 802.11 en ns-2, situar nodos en el espacio (los enlaces entre nodos son lógicos).

El módulo [12] desarrollado, CSIE, en la Chang Gung University (Taiwan) implementa 802.16 PMP para ns-2.29. Consta de la funcionalidad básica de la CS (Sublayer converge), el CPS (MAC common part sublayer) y la capa física. También incorpora un mecanismo simple de CAC (Call Admission Control) y un planificador.

El módulo NIST Seamless and Secure Mobility Project NS-2 802.16 [54] provee soporte para 802.16d y 802.16e. En capa física implementa OFDM (siedo parámetros configurables: la potencia de transmisión, prefijo cíclico, frecuencia, ancho de banda y tipo de modulación), en capa MAC implementa TDD (Time Division Duplexing), un planificador extensible (en estos momentos disponible sólo Best Effort+Round Robin), fragmentación y reensamblado de paquetes, movilidad (802.16e) y IEEE 802.21 (handover entre redes del mismo o diferente tipo). No implementa OFDMA (OFDM Access, versión multi-usuario de OFDM), FDD (Frequency Division Duplexing), ARQ (Automatic Repeat Request), QoS para el planificador, ajustes de potencia dinámicos ni FEC (Forward Error Correction).

La Universidad de Campinas desarrolló un módulo [38] para 802.16-2004 PMP con parche disponible para ns-2.28, centrado en la implementación de la capa MAC. Los mecanismos de asignación de ancho de banda y QoS están implementados exhaustivamente (soporta los 5 categorías: UGS, ertPS, rtPS, nrtPS y BE). El módulo soporta TDD y utiliza el modelo de canal inalámbrico disponible en ns-2 (la versión CMU).

En marzo de 2008 se anunciaba [37] una implementación de WiMAX basada en el módulo de NIST y que funciona sobre MIRACLE [53] (Multi-InterfAce Cross-Layer Extension library for the Network Simulator 2). Sin embargo, los links proporcionados ya no están activos y no se ha encontrado más documentación o referencias sobre el mismo (a parte de la página del proyecto [51] en sourceforge, inactivo desde entonces).

Nodos multi-interfaz: No soportado para interfaces inalámbricas, lo que constituye una de las deficiencias de diseño más graves de ns-2. A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos parches para resolver el problema, entre los que podemos nombrar MITF, TENS [15] (parche para ns-2.1b9a), y Hyacinth [9] (parche para ns-2.1b9a). Ramón Agüero de la Universidad de Cantabria desarrolló un módulo [3] que permite añadir múltiples interfaces en un solo nodo, aunque limitados a interfaces de la misma tecnología (las capas MAC/PHY deben ser idénticas para todos los interfaces). El proyecto MIRACLE [14] de la Universidad de Padua es un framework que provee mecanismos de intercambio de mensajes entre diferentes capas y permite la coexistencia

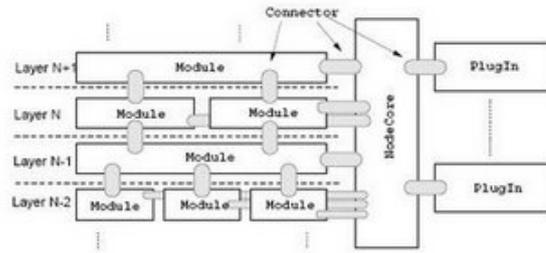


Figura 4.11: Módulo MIRACLE.

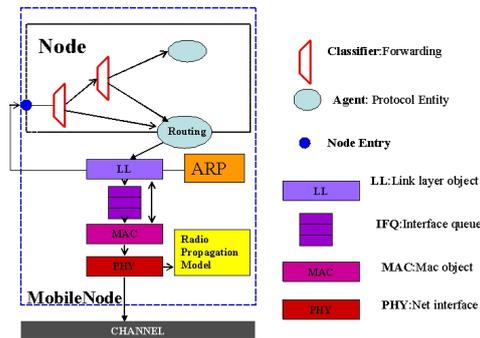


Figura 4.12: Módulo Mobile Node.

de múltiple módulos (de diferentes tecnológicas) en el mismo módulo (se pueden especificar diferentes capas física, MAC, de enlace o de red para un mismo nodo), ver Figura 4.11). MIRACLE se presenta como un módulo de uso general y modular sobre el que construir extensiones para ns2 (ya ha visto antes el módulo para WiMAX sobre MIRACLE).

Laurent Paquereau desarrolla activamente MW-Node [60], módulo que permite la inclusión de interfaces de diferentes tecnologías en un mismo nodo. Existen parches para la última versión de ns-2. Al igual que MIRACLE, esta extensión se presenta no sólo como una solución al soporte para múltiples canales e interfaces sino también como un framework para el desarrollo de otros módulos, superando las limitaciones de la implementación actual, que tiene un fuerte acoplamiento con la clase `MobileNode`, mostrada en la Figura 4.12.

Encaminamiento: Están disponibles tres tipos de encaminamiento para comunicación unicast: el algoritmo de caminos mínimos de Dijkstra estático (las rutas se computan sólo al inicio de la comunicación), dinámico (las rutas se computan cuando hay cambios en la topología durante la simulación) y encaminamiento DV (Distributed Bellmand-Ford, también conocido como Distant-Vector). Si lo desea, el usuario puede no usar ningún protocolo de encaminamiento y

crear manualmente las rutas. Para redes mesh con nodos móviles están implementados los protocolos DSDV (Destination Sequence Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing), TORA (Temporally-Ordered Routing Algorithm) y AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector).

Nivel físico configurable: Cada módulo visto en el apartado anterior tiene sus particularidades, pero en general los parámetros del canal físico son muy configurables.

Pérdida de paquetes: La versión tradicional de ns-2 implementa un sistema extremadamente simple para la pérdida de paquetes: si la potencia recibida de un paquete supera el umbral CS (Carrier Sense) de recepción, los paquetes pasan a la siguiente capa; en caso contrario, se descartan. No tiene un mecanismo de simulación de errores bit por bit que diera lugar a un PER. No obstante, y como ya ha visto, la librería `dei80211mr` ofrece mecanismos (curvas PER vs SNIR) que resuelven estas limitaciones

SNR/BER externo: No soportado.

Posibilidad de aislamiento entre estaciones: No soportado por la implementación CMU, sólo se tiene en cuenta el umbral CS (Carrier Sense), pero todos los nodos se ven entre sí. La nueva implementación `dei80211mr` añade un mecanismo (bastante simple) por el cual dos nodos separados una distancia mayor a una dada no se ven (y los paquetes no interfieren en absoluto).

Simulaciones distribuidas: No soportadas. Hubo algunas iniciativas como la desarrollada [62] por la Universidad Georgia Tech, pero no ha tenido continuidad (parche para ns-2.27). La Universidad Técnica de Berlín [13] también tiene un proyecto similar (con un parche para ns-2.26), pero igualmente su desarrollo está detenido. Ninguno de los dos proyectos parece haber tenido impacto en la comunidad de ns-2.

Uso de protocolos/simulaciones reales: No es posible usar aplicaciones reales, pero sí pilas TCP (FreeBSD, OpenBSD, IwIP y Linux) a través de Network Simulation Cradle [31]. El proyecto sigue en estos momentos activo.

Modo de emulación: Soportado [45], con diversos proyectos que añaden extensiones [16].

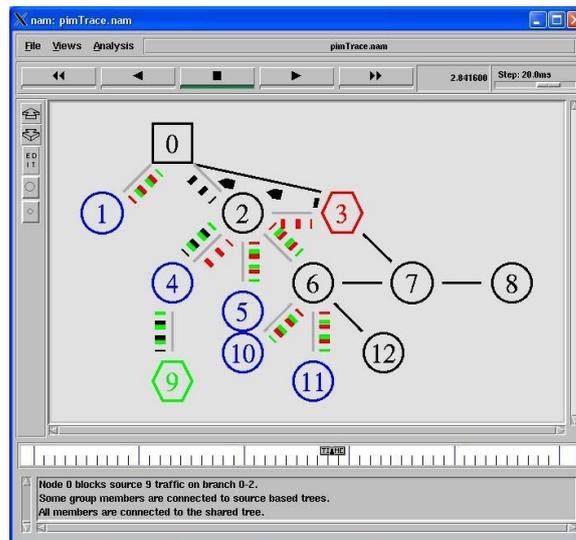


Figura 4.13: GUI del Nam.

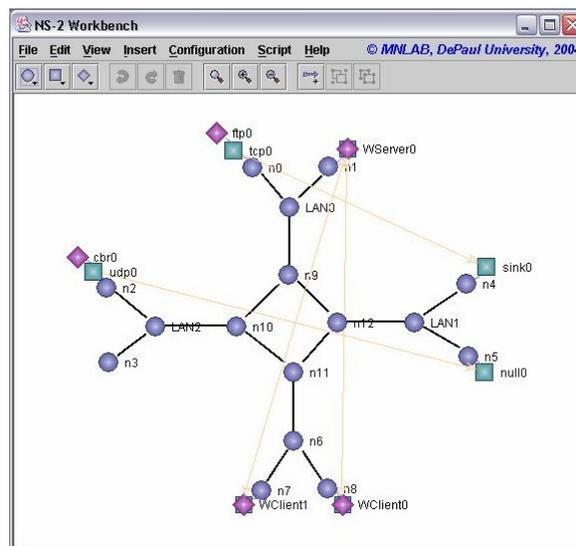


Figura 4.14: GUI del nsbench.

Modo de comandos/GUI: El interfaz con ns-2 se hace a través de comandos. Existen aplicaciones gráficas como Network Editor (que forma parte de nam [48], módulo oficial de ns-2), ver Figura 4.13), Extended Name Editor [21], nsbench [22] (ver Figura 4.14) o nsg [73]. La opción mayoritaria sigue siendo, sin embargo, la creación manual de los scripts Tel. En cuanto a la visualización de los resultados, está disponible el interfaz gráfico oficial nam (Network ANimator) y aplicaciones desarrolladas por terceros como tracegraph [41] o Trace Analyzer [6].

Comunidad y estado del proyecto Última versión estable: ns-2.33 del 17 de junio de 2009.

Se sigue trabajando en la nueva versión, pero la salida de ns-2.34 no tiene aún fecha.

Comunidad: Sin duda el simulador de red con una comunidad más amplia. Sirva como ejemplo la extensa página [44] de contribuciones de código, aunque en realidad se trata sólo de una pequeña parte del código disponible. Existen listas de desarrolladores, usuarios, de anuncios de nuevas versiones, y una especializada en usos educativos del simulador.

Publicaciones IEEE: Se han encontrado más de un millar de artículos relacionados con el simulador.

Valoración

ns-2 es el estándar de facto entre los simuladores libres tanto en el mundo académico como en la industria, y por ello dispone de una gran cantidad de código y documentación disponible sin comparación posible con el resto de simuladores. Uno de sus principales inconvenientes es que ns-2 arrastra carencias de diseño (reconocidas por la propia comunidad) que ha hecho necesario el desarrollo de numerosísimos parches y extensiones que quedan frecuentemente obsoletos por falta de mantenimiento. También es bastante aceptado que el desarrollo en ns-2 (con su dualidad C++/Tcl) es extremadamente incómodo y complejo.

Por último, destacar que si bien ns-2 cumple prácticamente todos los requisitos a través de extensiones desarrolladas por terceros, muchas de estas implementaciones no son compatibles entre sí, lo que impediría simular escenarios con todos los protocolos WiFi y WiMAX requeridos.

4.2.12. ns-3

ns-3 es un nuevo simulador de red de eventos discretos que pretende convertirse en el sucesor de ns-2. El proyecto está financiado por la NSF-CISE (National Science Foundation, Computer & Information Science & Engineering).

ns-3 tiene su punto de partida en el trabajo de Mathieu Lacage en el simulador yans [39] (Yet Another Network Simulator), durante el cual se identificaron en ns-2 un conjunto de fallos de diseño que juzgaron lo suficientemente importantes como para iniciar un nuevo simulador desde cero. Entre estos fallos destacaban la falta de versatilidad, debido básicamente a la dependencia

entre los modelos (acoplamiento), el deficiente uso de las técnicas de programación orientada a objetos, y el rígido acoplamiento entre C++ y OTcl.

A diferencia de su predecesor, ns-3 está desarrollado exclusivamente en C++, aunque permite el interfaz con lenguajes de alto nivel (por ahora sólo Python). Los antiguos scripts para ns-2 (desarrollados en OTcl) no funcionan en ns-3.

ns-3 es un proyecto reciente (iniciado en junio de 2006) y está planificado que el desarrollo de su código base se extienda hasta 2010. Por las características y las grandes expectativas que ns-3 ha creado en la comunidad, se hará un estudio en profundidad.

Análisis

Licencia: Usa la GNU GPL v2.

Sistema operativo: Sistemas POSIX como GNU/Linux, BSD, OS X y Microsoft Windows (con Cygwin o MinGW)

Código C++ (500k líneas). Las simulaciones se pueden hacer en C++ o con Python. En el futuro se prevé que también se pueda desarrollar el prototipado de protocolos con Python.

Protocolos inalámbricos:

802.11a: El desarrollo original implementa completamente 802.11a en modo infraestructura (AP/cliente) y ad-hoc (el código lo hereda de yans).

802.11b: Guangyu Pei y Tom Henderson presentaron en el Wns3-2009 (2009 Workshop on ns-3) una propuesta [32] para el desarrollo del modelo y su validación, pero no hay todavía código disponible de su implementación.

802.11e: De los dos tipos de acceso que contempla HCF (Hybrid Coordination Function), ns-3 implementa EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) y está en desarrollo el soporte para HCCA (Controlled Access).

802.11g: No se ha encontrado ninguna referencia a la implementación del modo g.

802.16-2004: Existe una implementación de 802.16-2004 (anuncio [24], documentación [25], código [4]), pero sólo implementa el modo PMP. Consultado el mantenedor [4] actual del paquete, en estos momento no está previsto extender el soporte a redes Mesh.

Nodos multi-interfaz: La herramienta es muy versátil, es posible añadir tantos interfaces como se desee, de la tecnología que sea, en cada nodo.

Encaminamiento: Si la simulación no está orientada a pruebas específicas de encaminamiento, por simplicidad se emplean una tabla de enrutado centralizada y única (objeto `GlobalRouteManager`). Además, existen implementaciones para encaminamiento estático (tanto para unicast como multicast) y OLSR (Optimized Link State Routing). La implementación de `Quagga` está en desarrollo.

Nivel físico configurable: En los interfaces inalámbricos las características del canal son configurables:

Pérdida de paquetes: Soportada, a partir del cálculo del SNR y la BER (en función de la modulación empleada).

SNR/BER externo: Como en el resto de simuladores no existe esta opción, se tendría que implementar.

Posibilidad de aislamiento entre estaciones: No se contempla.

Soporte para larga distancia en 802.11: Soportado, `ACKTimeout` y `SlotTime` son parámetros configurables.

Simulaciones distribuidas: No soportado en este momento, aunque es uno de los objetivos del simulador desde el inicio y está prevista como tarea para el GSC-2009 (Google Summer of Code).

Simulación de aplicaciones/protocolos reales: No soportado, aunque se está trabajando para ofrecer una API similar a la de los sockets BSD para facilitar el desarrollo de aplicaciones para ns-3. Por otra parte, está en desarrollo portar NSC [46] a ns-3, lo que permitiría usar

implementaciones reales del protocolo TCP (con el objetivo de, al menos, poder simular con el kernel de Linux).

Modo de emulación: Soportado, una simulación ns-3 puede enviar datos a través de redes reales a otros nodos de simulación ns-3.

Modo de comandos/GUI: Por el momento todas las operaciones se hacen por línea de comandos. No hay herramientas gráficas, aunque están en desarrollo aplicaciones que permitirán visualizar simulaciones a través de un GUI.

Comunidad y estado del proyecto Última versión ns-3.7.1 de marzo de 2010. para primavera de 2009 está planificado el lanzamiento de la nueva versión ns-3.8.

Comunidad: a pesar de contar con menos de 3 años de vida, ns-3 ya ha establecido una amplia comunidad alrededor (favorecido por seguir un modelo de desarrollo abierto y marcar una clara orientación en los objetivos del proyecto). Uno de los objetivos declarados de ns-3 es replicar a largo plazo el éxito de ns-2 respecto a la enorme cantidad de código externo. ns-3 dispone de varias listas de correo (para desarrolladores y usuarios), y aunque el tráfico sea más bajo que el de su predecesor, los desarrolladores principales son muy activos a la hora de responder.

Publicaciones IEEE: Hasta el momento hay 12 artículos en publicaciones [47] que sean del IEEE sobre el programa y 8 en los que se ha usado para sus investigaciones.

Valoración

ns-3 es un simulador que recoge el testigo de ns-2 en sus mejores aspectos (licencia libre, desarrollo abierto, colaboración amplia de la comunidad académica) a la vez que trata de superar las carencias y fallos de diseño (ampliamente compartidos por su comunidad de usuarios) de una herramienta con veinte años de historia. La cantidad de documentación en forma de tutoriales, detalles de la API, artículos, etc, con la que cuenta es un elemento a destacar.

4.2.13. Conclusiones

En este capítulo se ha hecho un repaso (somero en algunos casos, más detallado en otros) de simuladores de red de eventos discretos no propietarios. De entre ellos, se han visto en más detalle cuatro que, *a priori*, parecían cumplir el objetivo del proyecto (NCTUns, OMNeT++, ns-2 y ns-3).

De los dos primeros, NCTUns aparece como una aplicación interesante, pero demasiado rígida (especialmente por su dependencia del interfaz gráfico) y con una comunidad demasiado pequeña como para ser una opción fiable. Por su parte OMNeT++ cuenta con uno de los mejores diseños -modular y extensible- de entre los simuladores vistos, pero las limitaciones vistas (especialmente en sus entornos de simulación de redes inalámbricas) son muy severas.

ns-2 es una herramienta potente, con muchos módulos disponibles (aunque no todos actualizados), pero compleja e incómoda de usar, además de arrastrar decisiones de diseño que con el tiempo se revelaron no del todo acertadas. Aunque sobre el papel es posible encontrar módulos para todos y cada uno de los escenarios que se necesitan, no es posible simular en un mismo escenario todas ellas (sirva como ejemplo la tríada de implementaciones incompatibles para los niveles MAC y físico de 802.11).

En cuanto a ns-3, queda la sensación de que cumple la necesaria tarea de recoger la experiencia de ns-2 y que, a pesar de que no poder considerarse un producto todavía maduro y que tenga implementaciones todavía limitadas WiMAX, es un simulador con un buen diseño desde su origen, muy potente y flexible.

Por todas estas razones, se concluye que ns-3 es la opción más sólida con la que trabajar en el proyecto y sin duda la opción más adecuada pensando en su desarrollo a medio y largo plazo.

Capítulo 5

Solución adoptada

5.1. Introducción

Una vez finalizada la evaluación (Capítulo 4) se concluye que la mejor opción es construir la aplicación usando `Radio Mobile` como simulador de radio-frecuencia y coberturas radio, y `ns-3` como simulador de red.

Con ello se construye un sistema modular con las siguientes características:

1. Un planificador de radioenlaces y de coberturas de radio que trabaja con el modelo ITM (Irregular Terrain Model), capaz de dar como salida un grafo de la red, la matriz de visibilidad radio-eléctrica entre nodos, detalles de los sistemas (modulación, canal, etc) utilizados y la ubicación de los nodos en el mapa.
2. Un software intermedio o adaptador software, toma la salida del planificador de radioenlaces y la convierte en un fichero de texto que describe las características de la red.
3. `Wireless-Planning` es la capa software que funciona sobre `ns-3` para que la ejecución automatiza desde un script principal simple sea posible.
4. Un simulador de redes que recoge la información de visibilidad entre estaciones (recibida del planificador radio), y que, con las modificaciones necesarias, da soporte para `IEEE802.11e` adaptado para largas distancias e `IEEE802.16-2004` en modo punto a multipunto. Además, permite guardar datos de las simulaciones de tráfico en forma de trazas.
5. A través del postprocesado de trazas obtener resultados precisos para poder evaluar en

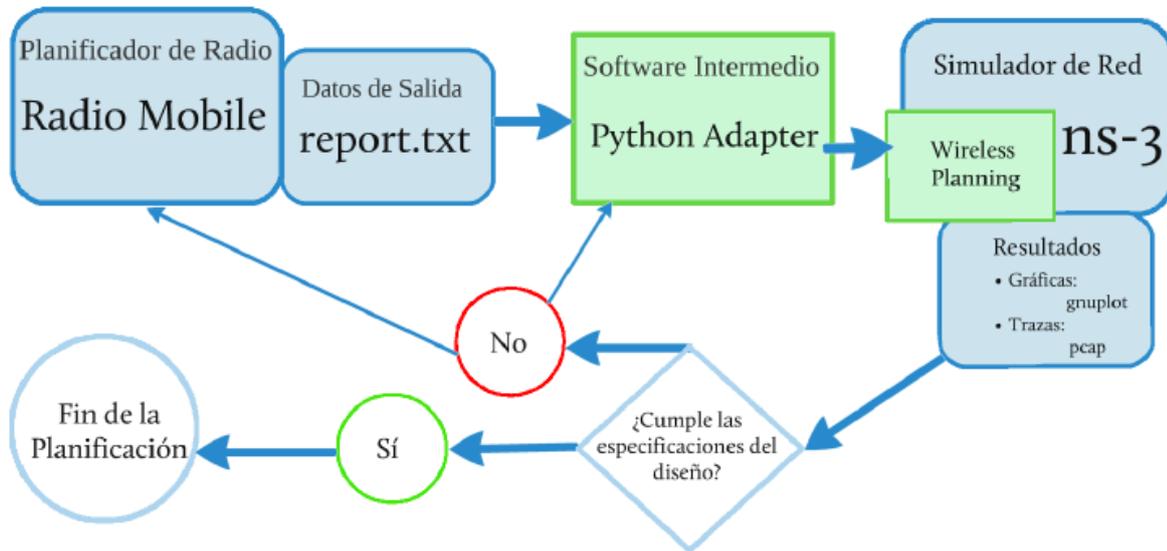


Figura 5.1: Arquitectura de la solución adoptada para el planificador de red.

definitiva si el comportamiento de la red satisface las necesidades que llevaron a ejecutar la planificación.

En la Figura 5.1 se muestra el diagrama de bloques de la implementación de la herramienta.

- Las cajas rectangulares azules con bordes redondeados son software existente.
- Las cajas rectangulares verdes son el software ha desarrollado en este proyecto.
- El resto, flechas, círculos y el rombo; son pasos lógicos.

Como ya muestra más en detalle en este mismo capítulo, la capa intermedia entre aplicaciones, el software adaptador o acoplador, se ha desarrollado de una forma modular y flexible de forma que pueda adaptarse a cambios ulteriores en el software o en las especificaciones del planificador.

5.2. Planificador de radioenlaces y de coberturas de radio

Radio Mobile 4.1.3 es un potente planificador de coberturas radio, pero al igual que su interfaz -que es exclusivamente gráfico- la mayoría de resultados los presenta también solamente en forma visual. Afortunadamente, Radio Mobile cuenta con la opción de crear un reporte de red

Tools ->Network Report ->File, en forma de fichero de texto que incluye toda la información relevante sobre la red.

5.2.1. Estructura de la información del reporte de Radio Mobile

El reporte está dividido en cuatro secciones:

Información general Incluye la hora de generación del reporte, los archivos fuente utilizados y algún dato informativo sobre el mapa.

Nodos Lista de nodos con su nombre y emplazamiento (coordenadas WGS84¹/UTM y elevación).

Sistemas Lista de sistemas utilizados en la red. Radio Mobile utiliza el término *sistema* no para describir un interfaz en concreto sino un tipo de interfaz (que después se puede usar en varios nodos). La información de los sistemas incluye datos como potencia transmitida, pérdidas, sensibilidad de los receptores, ganancias de antenas, etc.

Enlaces Incluye el listado de subredes y los enlaces que las forman. Cada subred contiene una cabecera con información sobre parámetros radio-eléctricos (frecuencia, polarización, detalles del modelo de propagación, etc). Después se muestra la matriz de visibilidad entre nodos, el rol que determina cada uno de ellos dentro de la red (master/slave, node/terminal o controlador/subordinado/repetidor), y el sistema que utiliza. Los datos relevantes para el adaptador software son los nodos que forman parte de una subred, el rol que desempeñan y el sistema.

A continuación, se muestra un ejemplo con una red sencilla con tres nodos:

```
Radio Mobile
Report generated at 17:38:51 on 07-04-2007
-----
General information
-----
Net file      RADIO MOBILE\RED.NET
Map file      RADIO MOBILE\RED.MAP
Map centre    13°48'03"S 071°42'03"W 19L BE 07986 72644
```

¹World Geodetic System 84, Sistema Geodésico Mundial 1984

Map size 75.0 km N-S, 103.01 E-W

Active units information

Name	Location	Elevation
JOSJOJAHUARINA 1	13°39'01"S 071°35'18"W 19L BE 19984 89469	4268.0m
JOSJOJAHUARINA 2	13°38'44"S 071°35'08"W 19L BE 20265 89994	4260.0m
KCAURI	13°38'04"S 071°31'43"W 19L BE 26418 91267	3622.0m

Systems

Name	Pwr Tx	Loss	Loss (+)	Rx thr.	Ant. G.	Ant. Type
Josjo 1 Sectorial PC0.200W		6.7dB	0.000dB/m	89.0dBm	17.0dBi	omni.ant
Josjo 1 Directiva PC0.200W		6.7dB	0.000dB/m	89.0dBm	19.0dBi	omni.ant
wifi 5.8	0.398W	2.0dB	0.000dB/m	93.0dBm	29.0dBi	omni.ant

Active nets information

1. Josjo1AP - Josjo2

Cluster topology

2400.0 MHz to 2483.0 MHz

Vertical polarization

Mode of variability is Broadcast, at

50% of time, 50% of locations, 50% of situations

Refractivity= 301 N-units, conductivity= 0.005 S/m, permittivity= 15

Continental temperate climate

Net members:	#	01	02	Role:	System:	Antenna:
JOSJOJAHUARINA 1	01	50	Node	Josjo 1 Directiva	PC6.5m	
JOSJOJAHUARINA 2	02	50	Terminal	Josjo 2 Troncal	9.0m	

Quality = 50 - number of resend

```

2. Josjo2 AP
Cluster topology
2400.0 MHz to 2483.0 MHz
Vertical polarization
Mode of variability is Broadcast, at
50% of time, 50% of locations, 50% of situations
Refractivity= 301 N-units, conductivity= 0.005 S/m, permittivity= 15
Continental temperate climate

Net members:          # 01 02 03 Role:          System:          Antenna:
JOSJOJAHUARINA 2     01   50 50 Node          Josjo 2 AP       11.0m
CCATCCA              02 50          Terminal        Uuario Final PCMCIA 5.0m
KCAURI               03 50          Terminal        Uuario Final PCMCIA 5.0m

Quality = 50 - number of resend

```

5.2.2. Información necesaria para la generación automática de redes

En la sección 5.2.1 ignoramos, deliberadamente, algunos de los parámetros de nivel radio-eléctrico. Esto se justifica porque, al diseñar una red en Radio Mobile, uno de los criterios que se sigue en el grupo de investigación es guardar un margen de 10-15dB por encima del umbral de recepción. Con este margen de seguridad -fruto de la experiencia- se evitan que imprecisiones del planificador pongan en peligro la viabilidad real de un enlace (o incluso de una red completa si son nodos troncales).

Por todo ello, a la hora de crear la herramienta -y teniendo en cuenta que no es más que su primera versión- nos abstraemos de aspectos de propagación de ondas y asumimos que, una vez pasado su diseño por Radio Mobile, la red puede trabajar sin problemas de visibilidad o de interferencia entre nodos.

La información relevante que se saca de la salida de Radio Mobile, es pues:

- Nodos: nombre y posición.
- Sistemas: nombre.
- Enlaces: nodos miembros de cada red, su sistema, rol en la topología de red.

Con estos parámetros se puede montar una red sobre un mapa, pero no se tiene información sobre los niveles superiores. Aunque Radio Mobile sólo se encarga de modelar el canal radioeléctrico, es muy cómodo (con la idea de mantener la información en una sola fuente) que el reporte de red incluya también información sobre la capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC) -tanto para IEEE 802.11 como IEEE 802.16- para la simulación en el simulador de red, ns-3.

La información relacionada con la topología de red se utiliza de forma directa para definir los roles de los nodos dentro de cada estándar. Las posibilidades son las siguientes: *Master/Slave*, *Node/Terminal* o *Tx, Rx, Rtx*. En cuanto las dos primeras topologías se deriva la siguiente la relación directa:

Master o Node = Access Point (AP) [WiFi] o Base Station [WiMAX].

Slave o Terminal = Station (STA) [WiFi] o Subscriber Station (SS) [WiMAX].

En de comunicación de datos, como es el caso, es más correcto utilizar los roles *Master/Slave* y no *Node/Terminal*

La tercera posibilidad es interesante si en algún momento se usara el estándar 802.16j, WiMAX con estaciones *Relay*. En este caso la equivalencia es la siguiente:

Tx, Rx, RTx = Base Station (BS), Subscriber Station (SS) o Relay Station (RS).

Después, para cada estándar, hay que fijar más parámetros.

En el caso de WiFi los posibles modos son las familias 802.11a o 802.11b y la velocidad a la que trabajan (de 1-11Mbps en 11a, de 6-54Mbps en 11b) ². Nótese que todas las estaciones asociadas a un punto de acceso comparten el mismo modo.

En el caso de WiMAX cada estación suscriptora puede utilizar una modulación diferente (es por ello que la estación base debe soportarlas todas). Las modulaciones que especifica el estándar WiMAX son siete: BPSK 1/2, QPSK 1/2, QPSK 3/4, 16 QAM 1/2, 16 QAM 3/4, 64 QAM 2/3 y 64 QAM 3/4.

Toda esta metainformación hay que codificarla en el reporte de texto, así que se debe establecer un protocolo de nombramiento para los sistemas.

²Aunque ns-3 soporte calidad de servicio (QoS), como 802.11e va por encima y comprende los modos a y b, no define nuevos modos para ello. Simplemente aplica QoS sobre esos modos.

5.2.3. Protocolo de Nombramiento de sistemas

El estándar y modo utilizado se podría codificar en el nombre del sistema, por ejemplo añadiéndola como cola (`NombreSistema [wifia-6m]` ó `NombreSistema 2 [wimax-BPSK1/2]`).

La ventaja de mantener toda la información en el sistema es que ésta puede guardarse en un fichero de Radio Mobile (*radiosys.dat*) que puede reusarse para crear otras redes. En este fichero aparecerían los sistemas predefinidos para WiFi y WiMAX.

En la práctica debemos acortar el nombre del sistema porque Radio Mobile limita esta cadena a 18 caracteres (en el reporte de red, no así en la aplicación). El caso más largo [`wimax-64QAM3/4`] tiene 14 caracteres, lo que sólo nos dejaría 4 para el nombre real de la red. Una posible codificación es:

```
WiFi A 6Mbps ≡ WFa6
WiFi A 12Mbps ≡ WFa12
WiFi B 6Mbps ≡ Wfb1
WiFi B 12Mbps ≡ Wfb2
WiMAX BPSK 1/2 ≡ WXbk12
WiMAX QPSK 1/2 ≡ WXqk12
WiMAX QPSK 3/4 ≡ WXqk34
WiMAX 16 QAM 1/2 ≡ WX16qm12
WiMAX 16 QAM 3/4 ≡ WX16qm34
WiMAX 64 QAM 2/3 ≡ WX64qm23
WiMAX 64 QAM 3/4 ≡ WX64qm34
```

El objetivo es, pues, crear un nuevo fichero simplificado y procesado (que se hace llamar fichero `net-info`) a partir del reporte de la planificación de cobertura de radio y utilizarlo para crear redes híbridas -de manera automática, sin más interacción del usuario- en ns-3.

5.3. *Python Adapter*

La capa interfaz entre Radio Mobile y ns-3 se ha desarrollado en *Python*³, y es totalmente independiente de ns-3. La principal ventaja de este esquema es que se gana en modularidad y flexibilidad: un cambio de simulador de red no afectaría en nada a este módulo, ya que éste

³lenguaje de programación interpretado, multiplataforma, y de licencia libre

genera un fichero en formato texto genérico que podría ser, en principio, usado por cualquier simulador.

Los script Python se puede descargar mediante el sistema de control de versiones `mercurial` del siguiente repositorio:

```
hg clone https://ns3-wireless-planning.googlecode.com/hg/ Rmw2Ni
```

Por otra parte, si en un futuro Radio Mobile modifica la estructura de los informes de red (o incluso si se sustituye el planificador radio por completo), lo único que habrá que actualizar es este modulo Python, sin que la simulación ns-3 se vea afectada. Obviamente, este esquema permite crear, de forma cómoda, la estructura de una red para simular después en ns-3 sin utilizar Radio Mobile en ningún momento.

Del conjunto de scripts que forman esta fase, el script principal es `radiomobile_ns3_report.py`.

5.3.1. Estructura del fichero net-info

Los scripts de Python 5.3.1 convierten un fichero `report.txt` 5.2.1 de Radio Mobile en un fichero `net-info`. Este último contiene la información relevante del reporte de Radio Mobile, simplificada y formateada de forma que ns-3 pueda leerla fácilmente.

```
= General information

Netfile: CUSCO-NE.NET
Generated: 2010-02-23T12:13:46

= Nodes

Josjojauarina 1      280      -9.31972,-75.14583      0,0
Josjojauarina 2      217      -9.26694,-74.94806      21728,5837
Kcauri      839      -9.31278,-74.81306      36559,768

Ccatcca      367      -9.20917,-74.81833      35979,12228

= Nets

== Josjo1-Josjo2
```

```

Mode: wifi

Node          Role          Distance to AP          Mode
Josjojauarina 1      AP            0          wifib-5.5mbs
Josjojauarina 2      STA          22482       wifib-2mbs

== Josjo2

Mode: wimax

Node          Role          Distance to SS          Mode
Josjojauarina 2      BS            0          All
Ccatcca       SS            1620       QPSK 1/2
Kcauri        SS            15670      16QAM 1/2

```

1. *General Information* - Información general

Incluye el nombre del archivo `.net` a partir del que se creó el reporte de red y la fecha de generación. Estos campos son estrictamente informativos.

2. *Nodes* - Nodos

Lista de nodos con su nombre, elevación (en metros) y emplazamiento. El emplazamiento se da de dos forma: coordenadas WGS84 y en coordenadas relativas al nodo de origen. Este segundo valor será el que usemos en ns-3 para colocar los nodos sobre el mapa (empleando los modelos de movilidad).

3. *Nets* - Subredes

Se detalla la lista de subredes. Para cada una de ellas se especifica el nombre, el estándar de comunicación (WiFi/WiMAX) y el listado, en forma de tabla, de los nodos que forman parte de la subred. En dicha tabla se muestra, para cada nodo, el nombre, el rol (*AP/STA* para WiFi, *BS/SS* para WiMAX), la distancia de la estación al nodo central (*AP* o *BS*) y el modo específico usado dentro del estándar.

La distancia entre nodos -que por cierto Radio Mobile la calcula pero no la incluye en el reporte- podría calcularse en la simulación de ns-3 a partir de las coordenadas, pero se

da el valor para simplificar al máximo el software adaptador en ns-3 (estas distancias se calculan a partir de las coordenadas WGS84 utilizando la fórmula de haversine⁴).

En cuanto al modo, en WiFi se utiliza directamente, por simplicidad, el formato ns-3, que incluye el estándar (a/b) y la velocidad (ejemplos: *wifia-6mbs*, *wifib-5.5mbs*). Análogamente, en WiMAX este campo determina la modulación de una estación subscriptora (ejemplos: *QPSK 1/2*, *16QAM 1/2*); las estaciones base emplean el valor *All* para enfatizar que funcionan con cualquier modulación que decidan usar las estaciones suscriptoras.

La traslación de nombres entre el reporte Radio Mobile y el reporte *net-info* se ha mantenido lo más simple posible: los nombre de nodos y redes se copia directamente, mientras que el nombre de sistema (según lo visto anteriormente) se transforma a partir de nombre simplificado (*WFa12*, *WX16qm34*, etc).

5.4. *Wireless-Planning*

5.4.1. Introducción

Wireless-Planning es una capa software que permite mediante la ejecución de su script principal, tomando como parámetro de entrada el fichero *net-info*, simular la red en ns-3.8.

De este modo el usuario se puede abstraerse del funcionamiento interno de ns-3. El script principal es la gran base de ejecución donde todo está preconfigurado y solo necesita que se modifique un apartado -adecuándolo a la red con la que se trabaja- que más adelante se explica.

El código de *Wireless-Planning* junto con ns-3.8, la última versión estable a día de hoy, se puede descargar mediante el sistema de control de versiones *mercurial* del siguiente repositorio:

```
hg clone https://ns-3.ns3-wireless-planning.googlecode.com/hg/ ns-3+WP
```

Por ello se pretende explicar por encima el proyecto ns-3, para que se entienda el contexto sobre el que se ha creado esta capa software, por llamarlo de algún modo.

5.4.2. Breve introducción al proyecto ns-3

El proyecto ns-3 lanza una versión estable aproximadamente cada medio año (bajo el nombre ns-3. n , donde n es el número de la versión). El 3 de mayo de este año ha salido la última versión

⁴La fórmula de haversine obtiene con gran exactitud la distancia entre dos puntos dados por latitud/longitud; es habitual su uso en navegación marítima.

que es `ns-3.8`.

Puede que dentro de poco salga `ns-3.8.1`, el último dígito suele ser el reflejo de un parche o actualización tras la corrección de nuevos fallos o *bugs*, en su mayoría reportadas por usuarios del simulador. Estos fallos se corrigen, con actualizaciones continuas, en la rama de desarrollo principal `ns-3-dev`, que es la base que da lugar a las versiones estables.

Además de la rama principal, existen otras en las que se llevan a cabo pruebas o se implementan nuevas funcionalidades. Este era el caso del módulo de WiMAX para ns-3 al inicio de este proyecto (cuyo investigador principal es I. Amine [4]) hasta que su rama se integró en la principal, `ns-3-dev`, en marzo de este año. La primera integración del módulo a una versión estable se ha dado con la publicación de `ns-3.8`.

La capa software `Wireless-Planning` se ha desarrollado a partir de `ns-3.4` y se ha trabajado y actualizado, de manera paralela, con `ns-3-dev` y `ns-3-wimax-release`. Desde su fusión sólo se ha trabajado sobre `ns-3-dev`. Para cuando a visto la luz `ns-3.8` sólo se ha podido adaptarlo a hacer un *merge*.

El código de ns-3 se encuentra disponible a través de la su web oficial www.nsnam.org y tanto en ficheros comprimidos o *tarballs*, como en un repositorio de código fuente. En la sección de la wiki, accesible desde la web, hay un apartado muy detallado sobre la instalación: <http://www.nsnam.org/wiki/index.php/Installation>

5.4.3. Estructura del código de ns-3

Los ficheros fuente de ns-3 están divididos en las siguientes carpetas:

```
applications contrib devices helper mobility node simulator
wscript common core internet-stack mpi routing test
```

La carpeta sobre la que más trabaja esta aplicación es `devices`, más concretamente `devices/wifi` y `devices/wimax`. Otra carpeta de interés es `helper`.

5.4.4. El script principal de ns-3

Se ha creado un script que se encarga, de manera automática, de todos los pasos necesarios para configurar la simulación y la posterior recogida de datos:

1. Creación de los nodos.

2. Ubicarlos en coordenadas x.y.z
3. Instalar interfaces WiFi y WiMAX a todos los nodos.
4. Adaptar los canales WiFi para largas distancias (cada uno en función de la suya).
5. Instalar el protocolo IP en todos los interfaces.
6. Crear tablas de encaminamiento.
7. Instalar el sistema de monitorización de tráfico en todos los nodos.
8. Tras la simulación, procesar las trazas de tráfico.
9. Generar gráficas que midan el comportamiento de la red.

La definición de escenarios (esto es, el conjunto de flujos) es lo único que hay que adaptar manualmente, dentro del script principal, para cada red o distinta simulación dentro de la misma red. Cada flujo se define, de manera muy simple, mediante los argumentos siguientes:

- Nodo origen (nombre o número de identificación [0,N-1])⁵
- Nodo destino (nombre o número de identificación [0,N-1])
- Velocidad de transmisión (en modo *string*, e.g. 5.5Mbps, 50kbps)
- Tipo de tráfico:
 - en WiFi la clase de acceso: AC_VO, AC_VI, AC_BK, AC_BE.
 - en WiMAX el flujo de servicio: UGS, rtPS, nrtPS, BES.

5.4.5. Arquitectura

ns-3 es un simulador de red muy potente y permite parametrizar prácticamente cualquier detalle en una simulación. La arquitectura de esta parte de la herramienta se puede sintetizar en los siguientes pasos, los nombres que figura bajo cada uno de ellos representan a las clases de C++ que lo implementan.

⁵siendo N el número total de nodos de la red.

- Lectura de net-info:
`netinfo-reader`
`report-2-config-data`
- Creación de la Red:
`net-data-struct`
`network-config`
`create-network`
- Montaje de Escenarios:
`net-test`
- Monitorización y Resultados:
`net-measure`
- Funciones Auxiliares:
`print`
`util`

Montaje de escenarios

Mediante llamadas a los métodos de `net-test` se definen los flujos que circularán por la red mediante unos parámetros muy simples como el nombre del nodo cliente y servidor, la tasa de transmisión, junto con el tiempo de inicio y fin de la transmisión.

Monitorización y Resultados

net-measure: es una clase muy versátil que se encarga tanto de instalar monitores de red en cada nodo como de recoger datos, procesarlos y mostrarlos a modo de resultado.

Hay una gran variedad de resultados, cada uno siendo más o menos útil para en función de lo que se persiga. Todo el tráfico que circula por la red se captura en unas trazas con formato *pcap* compatible con los analizadores de red más usuales como *tcpdump* o *Wireshark*. Por otro lado en un fichero xml se recogen multitud de datos, como paquetes transmitidos por cada flujo, como el retardo acumulado o el histograma del jitter, por poner unos ejemplos.

Por último, mediante mediciones periódica se obtienen distintas magnitudes y su variación a lo largo del tiempo así como algún histograma. Toda esa información se guarda en unos ficheros de texto que permiten generar gráficas mediante *gnuplot*. Las magnitudes que se manejan de momento en el dominio del tiempo, son el caudal o *throughput* de cada flujo y el total de todos ellos, la evolución del retardo de cada flujo y la media de todos ellos, así como en número de paquetes perdidos dentro de la red.

A las siguientes gráficas son fruto de los resultados gráficos obtenidos a través de ns-3 y creados mediante *gnuplot*. La figura 5.2

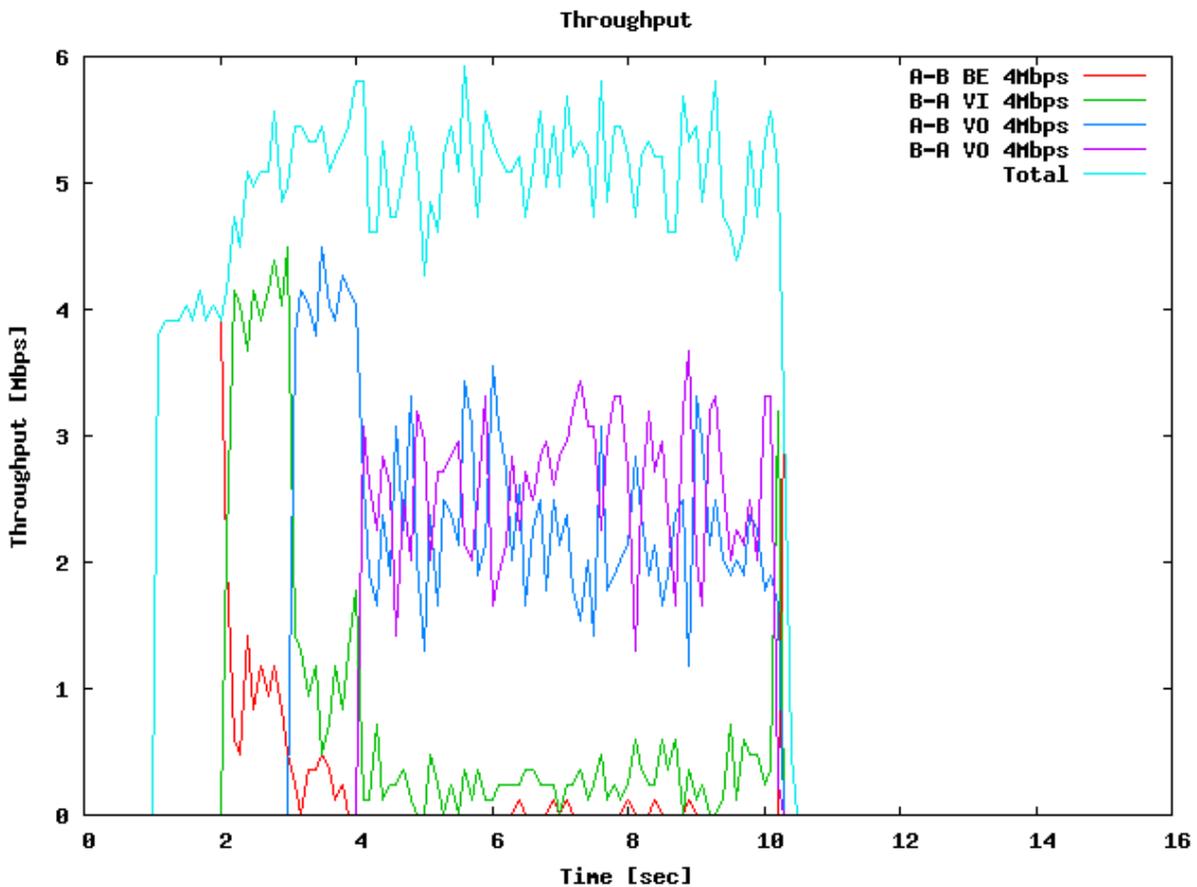


Figura 5.2: Ejemplo de resultado gráfico, throughput.

A parte de tener gráficas, en formato *png*, es muy útil tener los ficheros de texto **.plt*. Esto permite observar una gráfica y si en un momento de la red ocurre algo que llame la atención, se puede acceder al flujo e instante de tiempo deseado y obtener los valores numéricamente para

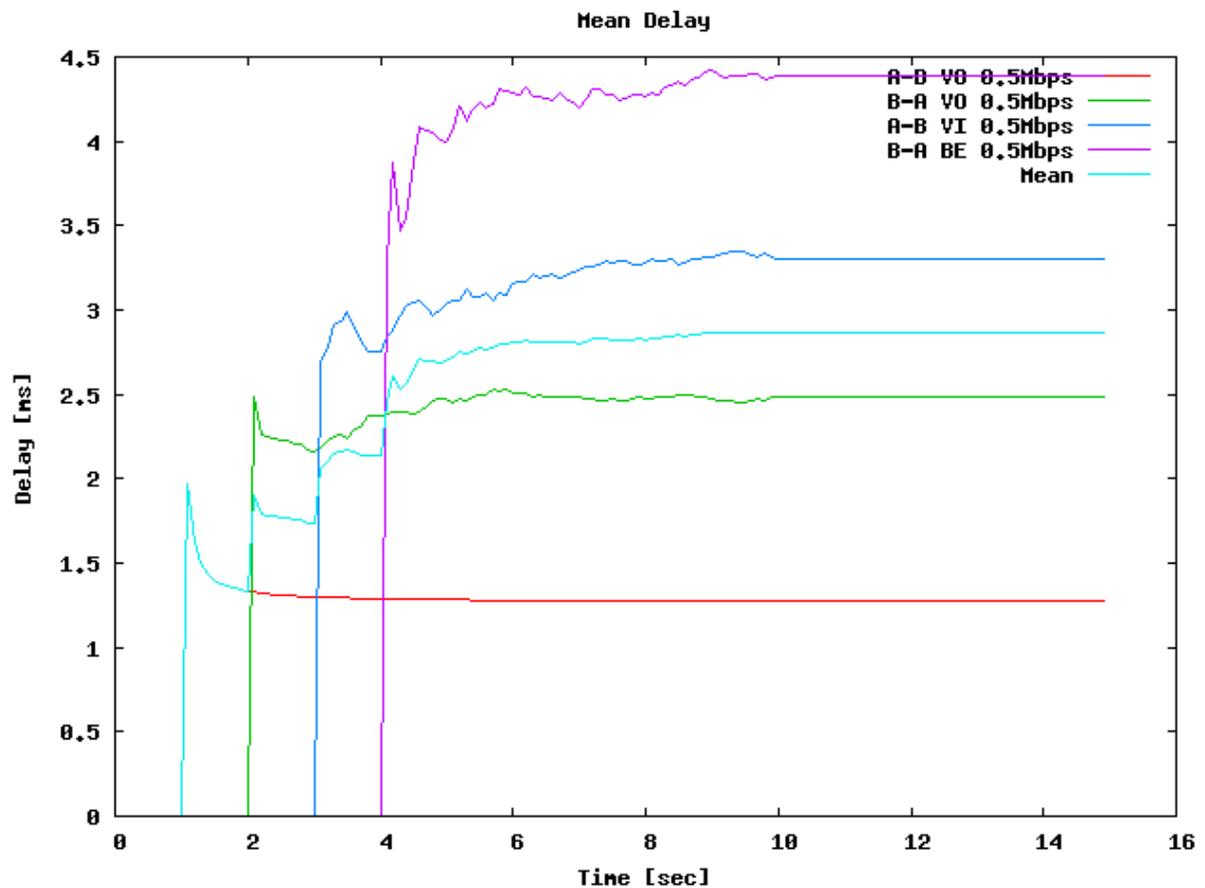


Figura 5.3: Ejemplo de resultado gráfico, retardo medio.

poder incluirlos para obtener aún más información, o mejor dicho, información más valiosa.

Clases auxiliares

print: es una clase muy útil a la hora de imprimir por pantalla datos de interés de la red. Entre las funciones que maneja se destaca como una descripción pormenorizada de cada nodo: interfaces instaladas, tipo de interfaz, dirección MAC, dirección IP, etc. Sirve también para alojar funciones que puedan ser comúnmente usadas por distintas clases, quizás sobre todo a la hora de depurar el programa.

util: se creó con la misma intención, alojar funciones que puedan ser comúnmente usadas por distintas clases, facilitando labores repetidas, como por ejemplo, obtener la dirección IP de un

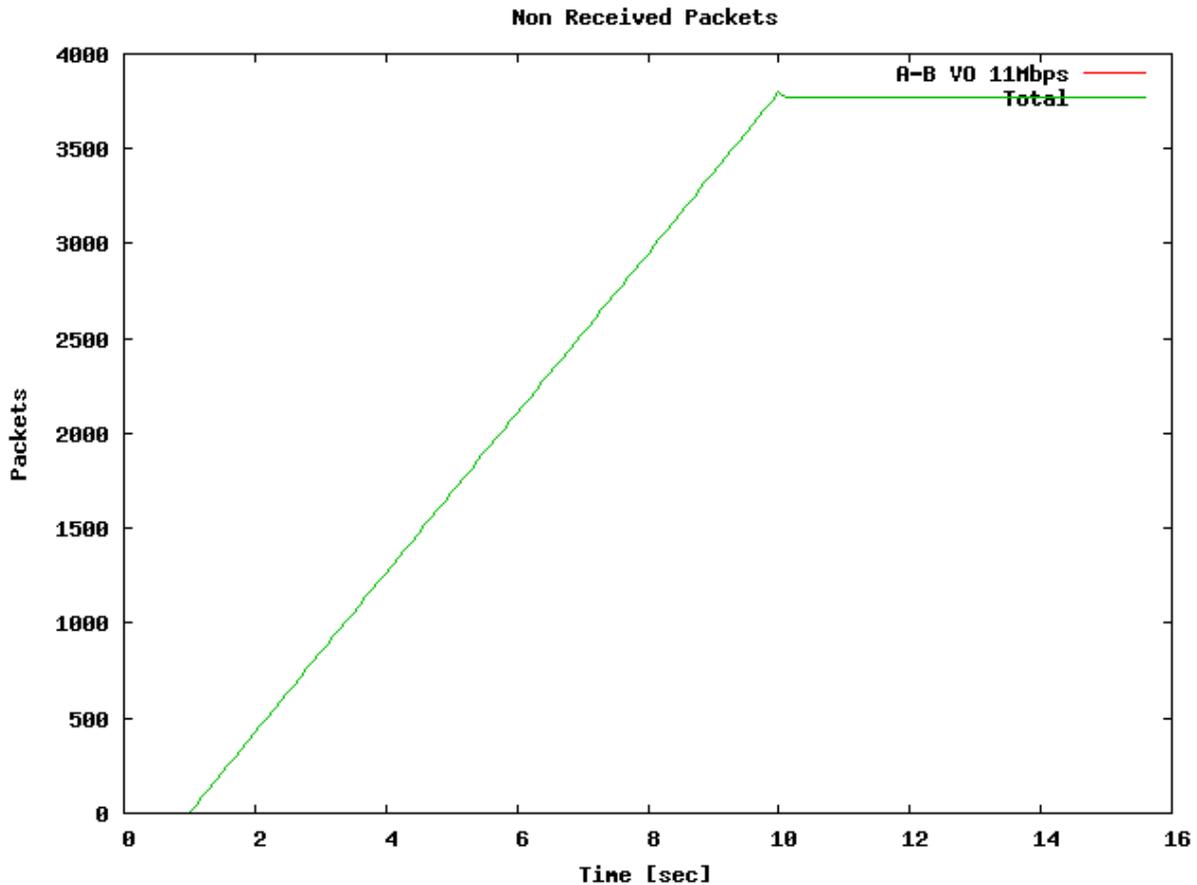


Figura 5.4: Ejemplo de resultado gráfico, paquetes no recibidos.

nodo a partir de su nombre, útil tanto para *net-test* a la hora de montar los escenarios como para *print* a la hora de recoger información a partir del contenedor de nodos.

Mantenimiento

El código, al igual que el código del core de ns-3, se ha desarrollado en C++ y se ha comentado siguiendo las pautas para una correcta generación automática de documentación mediante la herramienta Doxygen ⁶.

Además, en el repositorio donde se encuentra el código se ha creado un tutorial (en el apartado de la wiki) que sirve de introducción para los usuario.

⁶Para más información: www.doxygen.org

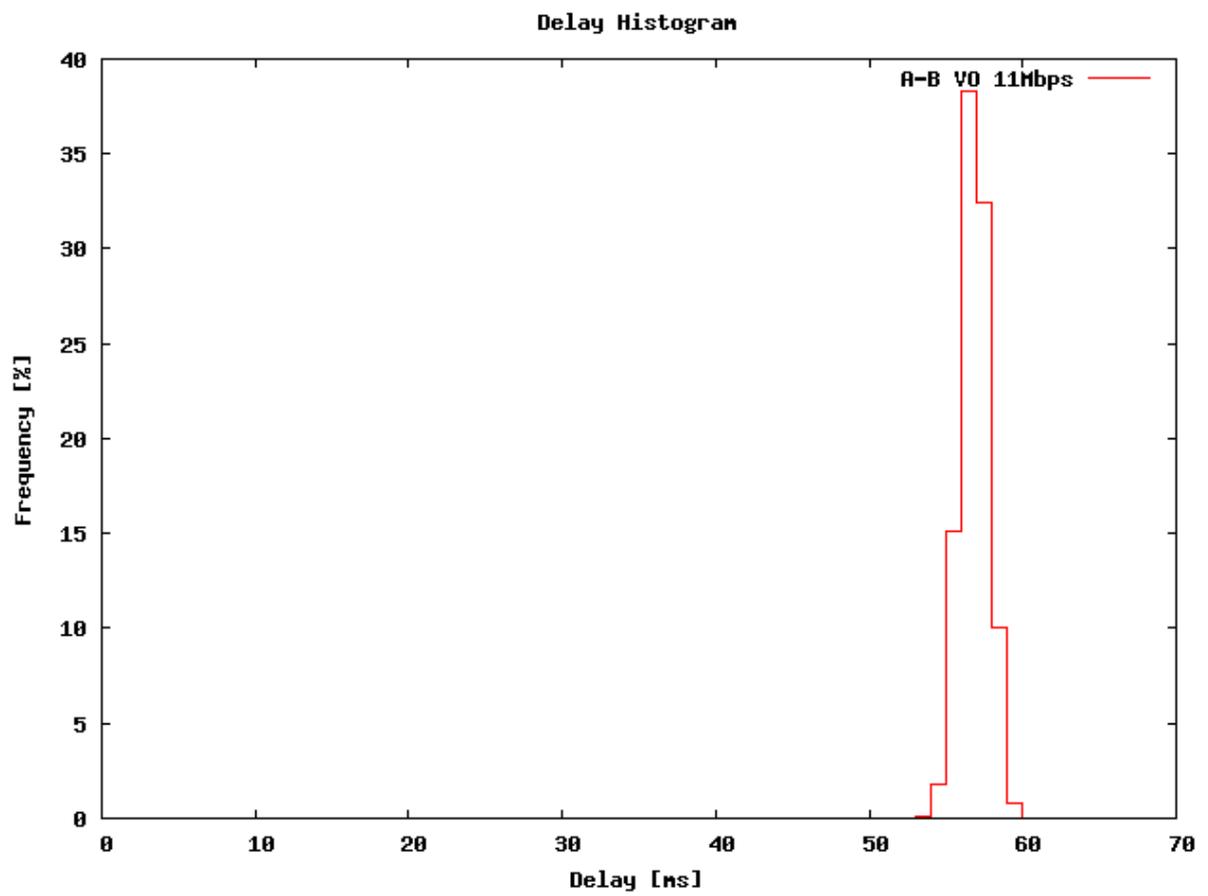


Figura 5.5: Ejemplo de resultado gráfico, histograma del retardo.

Validación de la herramienta

6.1. Introducción

En este capítulo se hace la validación de la herramienta para comprobar por un lado que cumple todas las funcionalidades exigidas y por el otro, ver si los resultados -en escenarios sencillos- se corresponden con los previstos por la teoría o datos empíricos.

6.2. Herramienta de Planificación

El resultado de este proyecto no es una aplicación software, sino que se ha llamado herramienta, debido a que hace uso de distintos simuladores y de software intermedio que actúa con ellos.

No obstante el resultado, la utilización de la herramienta, es más sencilla de lo que puede parecer debido al número de elementos que participan en él.

El usuario final planifica la parte radio-eléctrica en Radio Mobile (siguiendo el protocolo de nombramiento de los sistemas). Una vez finalizada exporta el reporte de texto plano. Mediante la invocación de un comando que ejecuta el script principal de Python a partir de el report.txt se crea un fichero net-info. El siguiente paso es modificar manualmente sólo la parte de generación de flujos (de una manera intuitiva siguiendo los ejemplos ofrecidos). Acto seguido, se ejecuta este script sobre ns-3, un solo comando. Finalmente, se han generado fichero de texto plano *.plt trazas *.pcap. Si se desea obtener gráficas se invoca a gnuplot, otro comando.

Resumiendo, hace falta la ejecución de tres comandos en un terminal tipo Unix y la modifi-

cación de un apartado de uno de los scripts.

Tener la información de las gráficas en texto plano es muy útil para procesarlo si se desea: por ejemplo para calcular los valores mínimos, máximos, medias, varianzas, etc. con importarlos a una simple hoja de cálculo bastaría.

6.3. Simulador de Radio

El simulador Radio Mobile permite crear redes de manera gráfica e intuitiva. Es un software de referencia dentro de los planificadores de radio gratuitos. El programa EHAS lo ha utilizado en todas las redes que ha diseñado como en el Napo, en Cusco, en Putumayo y demás redes, y a concluido que haciendo un correcta parametrización se obtienen resultados más que aceptables. Crear redes híbridas WiMAX+WiFi no supone ningún problema, el simulador no entiende de protocolos sino de parámetros radio-eléctricos, y Radio Mobile abarca un rango mucho mayor de frecuencias que el utilizado por estos dos estándares, trabajando adecuadamente en el rango de frecuencias objetivo en concreto.

A la hora de montar los sistemas en los nodos, lo único que hay que tener en cuenta es especificar correctamente su rol y seguir el protocolo de nombramiento de sistemas previamente definido (ver apartado 5.2.3) para determinar el estándar de comunicación utilizado en cada sistema.

6.4. *Python Adapter*

Los scripts encargados de transformar `report.txt`, el fichero de salida de Radio Mobile, en un fichero de formato `net-info` se ejecutan mediante un sólo comando desde el terminal.

Recorre el fichero de arriba a abajo, dividiéndola en las diferentes secciones de las que está compuesta. Una vez obtenidas las secciones, se procede a examinar cada una de ellas filtrando la información innecesaria de cara a la preparación de la simulación de la red mediante el simulador de eventos discretos.

El rol de cada una de las interfaces de cada nodo, se traduce a su papel en los distintos estándares de comunicación inalámbricas. Analizando el nombre del sistema, se obtienen el estándar que usa cada interfaz junto al modo en el caso de WiFi y la modulación empleada en el caso de WiMAX.

También se ha dotado de un poco de inteligencia a esta etapa como se ha descrito en el capítulo anterior. Se utiliza para calcular la distancia entre nodos y añadirlo en el nuevo fichero como un campo (inexistente en report.txt). Este paso facilita la adaptación del protocolo WiFi para largas distancias, en cada caso a la respectiva distancia entre nodos. Para facilitar aún más la colocación de los nodos también se añade un sistema de coordenadas relativo al primer nodo (situando este en el origen de coordenadas). Esto permite al usuario hacerse una idea de la distribución de los nodos y las distancias que los separan más fácilmente.

Aunque su carga computacional no es muy alta, hace que la ejecución de la herramienta sea más eficiente, teniendo en cuenta de que este paso se va a hacer una sola vez por red, mientras las simulaciones sobre ns-3 pueden ejecutarse varias veces jugando con distintos escenarios de tráfico, prioridades, etc.

6.5. *Wireless-Planning*

La capa software programada sobre ns-3 cumple los requisitos exigidos. Permite a un script sencillo, simular las redes procedentes de Radio Mobile con todo el potencial de ns-3.

Para validar todos los pasos que sigue el script principal (ver sección 5.4.4) se ha cogido una parte de la red Alis montada en Cusco, el noreste concretamente, que tiene 7 nodos y 4 subredes. Este red es un buen ejemplo, es reducido pero su topología da mucho juego. Se muestra el diagrama de la red en la Figura 6.1.

La asignación de direcciones IP es automática y a raíz de ello se crea una tabla de enrutamiento. La visibilidad radio-eléctrica, se ha comprobado que coincide con lo que se le ha impuesto tras la lectura del reporte de red.

Una vez que se ha consolidado esta capa software, se ha procedido a simular la red de Cusco entera que contiene 21 nodos y 13 subredes, una red bastante extensa. Se muestra su diagrama en la Figura 6.2.

6.6. Resultados obtenidos de ns-3

La metodología de la simulación de escenarios es la siguiente: primero WiMAX, luego WiFi y finalmente redes híbridas. Los escenarios se plantean con complejidad creciente. La red más sencilla consiste en dos nodos -un enlace punto a punto- con un solo flujo. Lo más complejo es

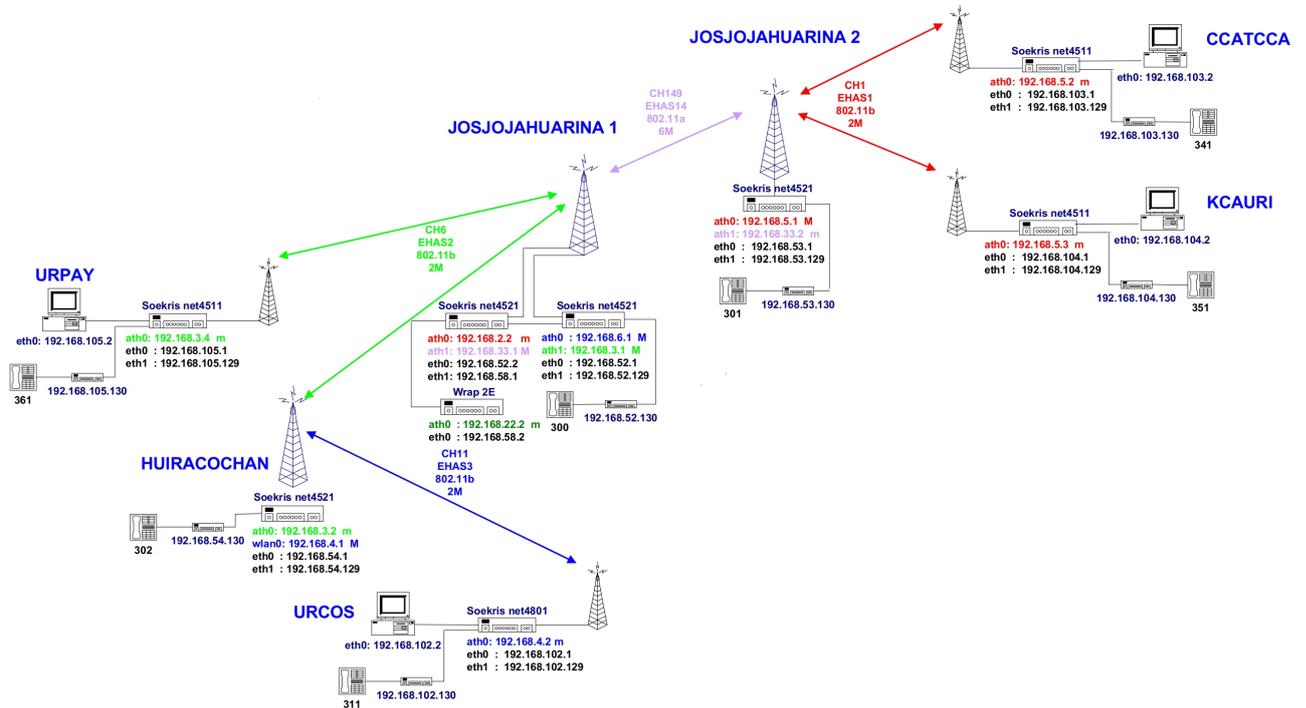


Figura 6.1: Diagrama de red de la parte noreste de la red Alis de Cusco.

una red con varios nodos -enlaces punto a multipunto- con varios flujos.

Los parámetros más relevantes en las mediciones son el caudal o *throughput* y el retardo o *delay*. Los resultados se centran en el primer parámetro.

6.6.1. Caudal en WiFi

La implementación de la capa PHY es mucho más rápida que la de WiMAX, lo que permite simular más escenarios en un mismo intervalo de tiempo. La primera prueba es un enlace punto a punto entre dos nodos en el que se ha medido la tasa de transmisión en los modos WiFi más comunes a distintas distancias. En WiFi la diferenciación de tráfico se lleva a cabo mediante etiquetado de paquetes con diferentes clases o *Access Class*, del más prioritario al menos: VO (voz), VI (vídeo), BE (best effort) y BK (background).

Caudal en saturación en función de la distancia

En la Tabla 6.1 y en la Figura 6.3 se muestran los valores obtenidos del caudal en saturación con un solo flujo de *Access Class* VO, tanto para 802.11a a 6Mbps como para 802.11b a 11Mbps.

Distancia [Km]	Throughput [Mbps]	
	802.11b 11Mbps	802.11a 6Mbps
0	9	5.5
1	8.85	5.4
3	8.50	5.25
5	8.10	5.1
10	7.25	4.8
15	6.75	4.75
20	6.15	4.35
30	5.40	3.75
40	4.75	3.5
50	4.25	3.3
70	3.5	2.75
90	3	2.4
110	2.6	2.2
150	2	1.75

Tabla 6.1: Throughput en función de la distancia en 802.11a y 802.11b.

Diferenciación de tráfico

Las simulaciones siguientes se han hecho con 802.11b a 20km, siendo los parámetros más relevantes:

Slot Time += 2xTprop

ACKTimeout += 2xTprop

MAC header = 20 Bytes

PHY header (PLCP) = 96bits (short)

CWmin=[32,32,32,32]

CWmax= [1024, 1024, 1024, 1024]

AIFSN= [2, 3, 4, 5]

TXOP= [0, 0, 0, 0]

AccessClass= [VO, VI, BE, BK]

Caudal con un sólo tipo de tráfico En este caso, la Tabla 6.2 muestra el caudal medio en saturación en función del tipo de tráfico.

Access Class	Throughput [Mbps]
VO	6.15
VI	5.1
BE	3.9
BK	3.75

Tabla 6.2: Throughput en función del Access Class.

Dos flujos con el mismo tipo de tráfico En este otro caso, Tabla 6.3, se mide el caudal medio en saturación de los diferentes flujos y el total.

Access Class	Throughput [Mbps]		
	Total	Flujo 1	Flujo 2
VO	5.15	2.57	2.58
VI	4.81	2.59	2.22
BE	4.26	2.06	2.20
BK	4.11	2.1	2.01

Tabla 6.3: Throughput en saturación en función del Access Class.

En este caso tenemos flujos de igual tasa y tipo de tráfico, así que es obvio que el caudal se reparta a partes iguales, tal como sucede en el simulador.

Dos flujos con distinto tipo de tráfico La tasa en saturación es inferior a 6.2Mbps, así que asignamos arbitrariamente una tasa de 4Mbps para cada flujo para ver cómo se reparte el ancho de banda entre dos flujos de distinta prioridad en plena saturación.

En estas últimas mediciones, Tabla 6.4, se mide el caudal medio en saturación de los diferentes flujos con diferentes tipos de tráfico y el total.

Access Class	Throughput [Mbps]		
	Total	Flujo 1	Flujo 2
VO vs VI	5.95	4.00	1.95
VO vs BE	5.35	4.00	1.35
VO vs BK	5.20	4.00	1.20
VI vs BE	5.32	4.00	1.32
VI vs BK	5.08	4.00	1.08
BE vs BK	4.58	2.37	2.21

Tabla 6.4: Throughput en saturación en función del Access Class.

En todos los casos la clase más prioritaria se queda con todo el ancho solicitado excepto en el caso entre BE y BK, en el que el más prioritario tiene más caudal pero no todo el solicitado.

También se aprecia que el caudal total varía ligeramente, siendo mayor cuanto mayor es la prioridad. Es el reflejo del uso de distintas ventanas de contienda en función de la clase.

6.6.2. Caudal en WiMAX

Las simulaciones en WiMAX (debido a la complejidad de la capa PHY) tienen una carga computacional muy elevada, así que para las simulaciones se han seleccionado sólo un conjunto de las modulaciones que define el estándar.

Los parámetros de la capa física OFDM utilizados se muestran en la Tabla 6.5.

Caudal en saturación La primera serie de pruebas simulan un enlace de punto a punto entre dos nodos donde se mide la tasa de transmisión en saturación en el enlace descendente con un solo flujo. La distancia de referencia que se ha tomado es de 5km.

En la Tabla 6.6 se muestran los valores máximos teóricos del throughput en saturación.

Los valores obtenidos con ns-3 6.7 se asemejan bastante a los valores obtenidos teóricamente.

6.6.3. Redes Híbridas WiFi+WiMAX

En escenarios que incluyan redes mixtas WiFi/WiMAX hay que tener en cuenta la forma en que ns-3 permite establecer los tipos de tráfico para cada estándar: en WiFi se marca -

Parámetro	Símbolo	Cálculo	Valor
Banda de frecuencia			5 GHz
Duración del frame			10 ms
Ancho de banda	Bw		20 MHz
Portadoras	N_{FFT}		256
Portadoras de datos			192
Factor de muestreo	n		144/125
Frecuencia de muestreo	fs	$n \cdot Bw$	23.04 MHz
Espacio entre subportadoras	$f\Delta$	fs/N_{FFT}	90000
G	G	Tg/Tb	1/4
Tiempo de símbolo útil	Tb	$1/f\Delta$	11.11 μs
Tiempo del prefijo cíclico	Tg	$G \cdot Tb$	2.78 μs
Tiempo de símbolo OFDM	Ts	$Tb + Tg$	13.89 μs
Duración de PS		$4/fs$	0.1736 μs

Tabla 6.5: Parámetros de la PHY de OFDM.

opcionalmente- la prioridad de los paquetes (con un *Access Class*) en el momento de enviarlo, y esta información se conserva a lo largo del trayecto que cubre el paquete. En WiMAX, en cambio, los tipos de tráfico (service flow) se configuran en la conexión -obligatoriamente, sino la simulación no funciona- entre estación base y estación subscriptora.

En redes mixtas, y como es obvio, un paquete proveniente de una red WiFi que entre en una red WiMAX perderá la información de prioridad. De igual forma, un paquete originado en una red WiMAX pasará a una red WiFi sin ningún tipo de marcaje de prioridad (ya que en WiMAX la prioridad se configura en la conexión).

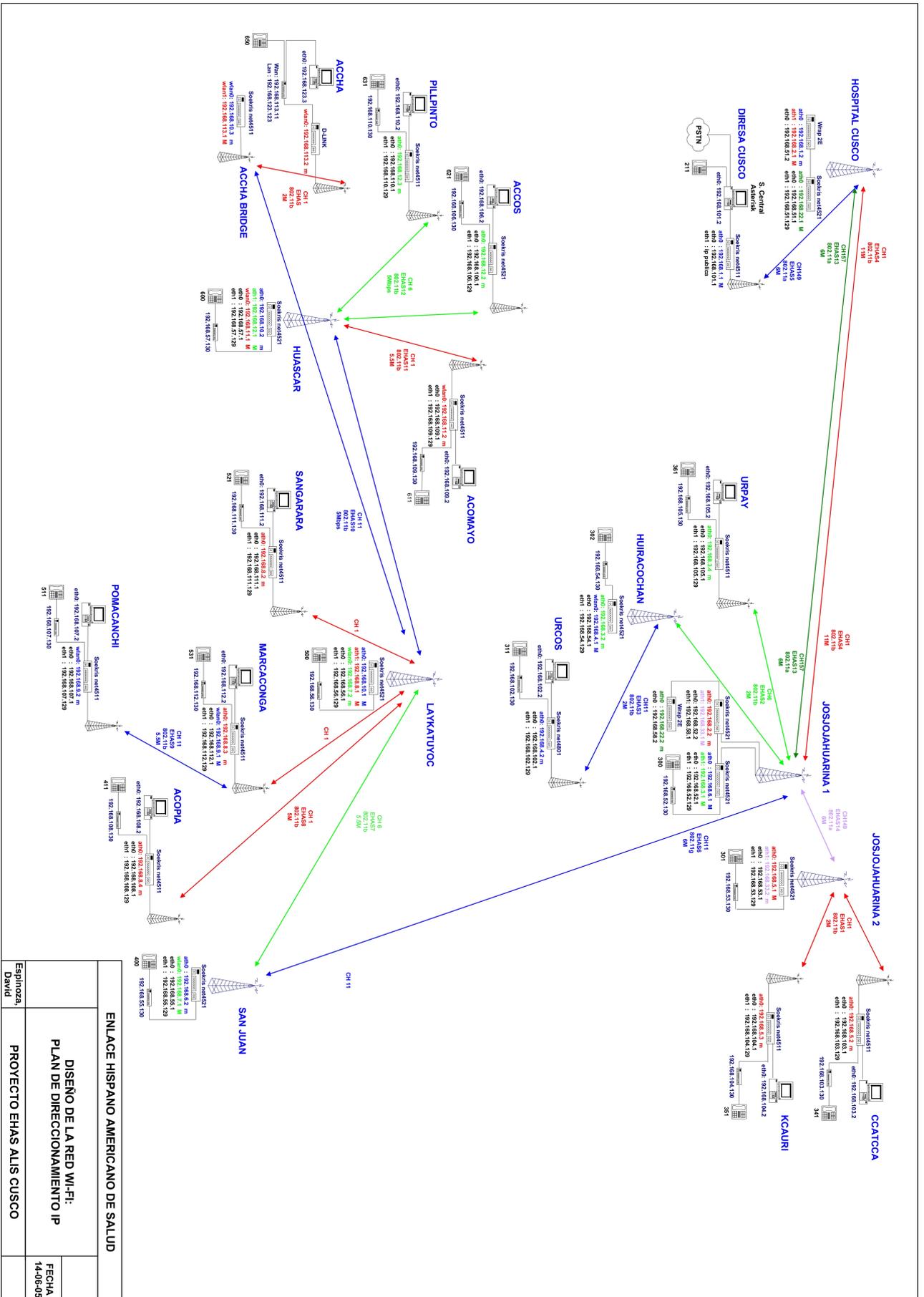
Para garantizar la calidad de servicio extremo a extremo en redes híbridas sería necesario, pues, una capa adicional en la torre de protocolos (por ejemplo usando *DiffServ*).

Modulación Bw 20MHz	Throughput [Mbps]
BPSK 1/2	6.91
QPSK 1/2	13.82
16 QAM 1/2	27.65
64 QAM 3/4	62.21

Tabla 6.6: Throughput teórico alcanzable en función de la modulación en 802.16 [26].

Modulación Bw 20MHz	Throughput [Mbps]
BPSK 1/2	6.61
QPSK 1/2	13.47
16 QAM 1/2	27.25
64 QAM 3/4	61.73

Tabla 6.7: Troughput en función de la modulación en 802.16.



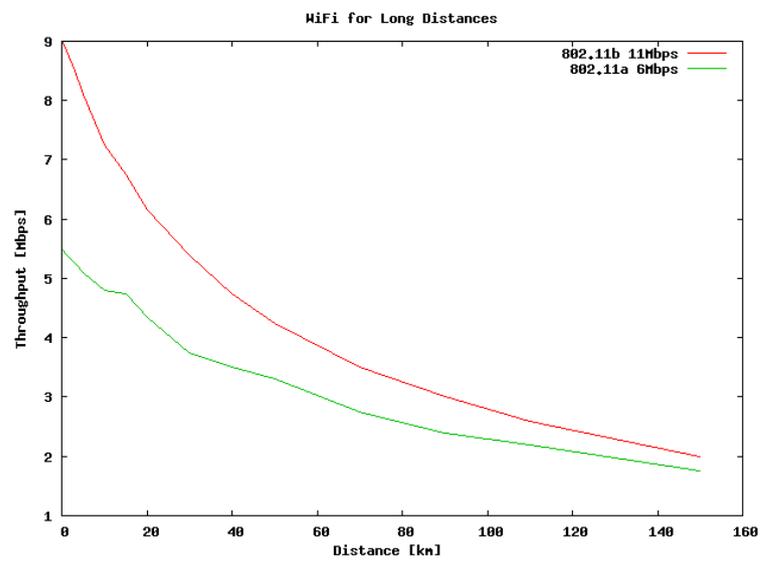


Figura 6.3: Throughput en función de la distancia en 802.11a y 802.11b.

Conclusiones

En este proyecto se ha implementado una herramienta software para la planificación de redes híbridas WiMAX + WiFi sobre terrenos irregulares en bandas libres. Se han cubierto las funcionalidades requeridas para una primera versión, aun así, se prevé que la herramienta pueda crecer en el futuro con nuevas funcionalidades y mejoras.

Se ha partido de la carencia de algún tipo de planificador de redes libres o gratuitas. Si que se había detectado la existencia de programas separados que cubrían parcialmente las necesidades, pero ninguna íntegramente. Básicamente, se han detectado dos piezas claves, por un lado un simulador de radiofrecuencia y por el otro un simulador de red, un simulador de red de eventos discretos. Enlazando ambos programas y adaptándolos para el caso concreto para el que se precisan, se puede llegar a construir un planificador de redes inalámbricas rurales gratuita.

Gran parte del proyecto se ha dedicado a la elección de los componentes más adecuados. Esta labor de la recopilación del estado del arte es ardua pero necesaria para afirmar que los simuladores que a priori parecían los más capacitados, en efecto, sí lo son.

Para la primera parte, que suele ser una planificación radio-eléctrica, no hay una gran elección a la hora de evaluar diferentes alternativas, ya que solo se han podido encontrar dos a priori con posibilidades de ejercer la función que se les pedía, Radio Mobile y Splat!. Radio Mobile ha demostrado ser una pieza muy válida en la herramienta. Su gran pega es, no ser software libre aunque sea gratuito. Se mencionan un par de detalles sobre las repercusiones que esto conlleva:

1. El programa sí que calcula (entre muchas otras cosas) las distancias entre los nodos, pero no los incluye en el reporte final. Hacer al usuario ir enlace por enlace a una cierta pestaña del programa para apuntar este valor, resta toda la intención de automatización del proceso.

Por ello, se recalculan estas distancias, a partir de las posiciones de los nodos.

2. La necesidad de meter información añadida o metainformación en los nombres de sistemas -para definir tipo de comunicación: WiFi y modo o WiMAX y modulación- es otro impedimento para trabajar con normalidad. El hecho de que la longitud de los nombres de los sistemas, se ve limitado por la longitud con la que aparece en el reporte (no dentro del programa), obliga a establecer un protocolo de nombramiento en muy pocas letras, restando espacio a la longitud del nombre en sí.

Parecen dos pequeños detalles pero si el programa hubiese sido de software libre, hacer estas pequeñas modificaciones habría sido posible, para que el informe de salida se pareciese más a net-info y no necesitase ni el protocolo de nombramiento de sistemas ni tanto procesado para el cálculo de las distancias.

La evaluación de los distintos simuladores de red de eventos discretos, sin embargo a sido un mundo totalmente distinto. La gran variedad de simuladores disponibles no permite analizar cada uno en detalle y mucho menos instalarlo y probarlo para verificar las funcionalidades que ofrece y limitaciones existentes.

De los simuladores que sobre el papel cumplían los requisitos mínimos se ha hecho un análisis más exhaustivo de 4 de ellos: NCTUns, OMNet++, ns-2 y ns-3. Se han llegado a instalar y probar, aunque sea superficialmente. La gran duda ha surgido entre ns-2 y ns-3, dos proyectos coexistentes, impulsados por el mismo grupo de desarrolladores. ns-2 tiene un gran recorrido en el mundo de los simuladores libres, sin embargo las aportaciones tan heterogéneas y la rigidez de desarrollo han sido sus pegas. Por el otro lado, ns-3 tiene un diseño modular y totalmente orientado a objetos, lo cual permite flexibilidad en su desarrollo que sea más fácil integrar satisfactoriamente futuras aportaciones (tanto internas, como externas). Su pega, no cabe duda, es la inmadurez. El hecho de que haya caído la balanza a favor de ns-3 ha sido una clara apuesta a futuro, viendo la trayectoria de ns-2, ns-3 tiene un gran margen de confianza respecto a su evolución y continuidad.

Se empezó a trabajar en la idea de ofrecer un script sencillo que permitiese, en muy pocas líneas, acceder al gran potencial de ns-3 y simular redes sin necesidad de que el usuario sepa manejar ns-3.

Esta parte del proyecto es la que más tiempo y esfuerzo a requerido. Tras superar la curva de aprendizaje de ns-3, se realizaron unas pruebas exhaustivas sobre WiFi adaptado para largas

distancias. Tras ver que los resultados eran los esperados, parecidas a las ofrecidas por ns-2 en el caso de un enlace punto a punto, se realizó el diseño de la capa software Wireless-Planning.

El primer gran escalón ha sido crear una cadena que maneja redes WiFi, desde la creación de nodos en ns-3, instalación de los tres primeros niveles de la torre de protocolos, instalación del sistema de movilidad (nodos fijos), creación de flujos, simulación y obtención de gráficas mediante el sistema de monitorización.

El siguiente salto ha sido incluir etiquetas de calidad de servicio en los paquetes y aunque conceptualmente fuese una tarea simple, ha requerido más tiempo de lo planificado.

Una vez esta sólida base se ha construido, se ha trabajado en paralelo por un lado con la conversión del fichero de salida de Radio Mobile, report.txt, al fichero diseñado ad-hoc, info-net, para el uso específico de crear redes automáticas. Para ello, se decidió la información necesaria que debían aportar los nodos, interfaces y redes, lo que originó el protocolo de nombramiento de los sistemas. Por el otro lado, tras haber adquirido conocimientos básicos sobre la tecnología WiMAX, se ha procedido al entendimiento de su implementación en el módulo, fuera de la rama principal todavía, que en un futuro se preveía incorporar en ns-3.

La integración de redes WiFi y WiMAX ha sido un gran paso que supuso bastante tiempo para que su integración fuese exitosa. El tema de ofrecer calidad de servicio extremo a extremo se ha llevado a cabo respetando las redes WiMAX, que son las que más posibilidad tienen de cubrir los mayores saltos en kilómetros como en caudal que han de soportar. El acceso a los nodos clientes mediante la red WiFi, una vez pasada la red troncal WiMAX, se ha realizado sin etiquetado.

Después de haber cubierto las necesidades de lado a lado, desde la lectura de report.txt hasta la impresión de gráfica mediante gnuplot, se ha dado paso a la fase de validación de la herramienta de planificación.

Por su parte el simulador de red ns-3 ha demostrado tener un enorme potencial, un equipo de desarrollo sólido y una comunidad de usuarios muy activa. Dado que el simulador tiene su origen en la implementación de un simulador para redes WiFi, no es extraño que el soporte para este estándar sea extenso y que ofrezca resultados más o menos fieles a la realidad. Desafortunadamente no es ésta la situación en del módulo WiMAX -al menos por el momento-, en la que se puede constatar cierta inmadurez de la implementación. Teniendo en cuenta de que acaba de incorporarse a la última versión estable del simulador por primera vez, el pasado 3 de mayo, es comprensible.

Resumiendo, el resultado obtenido como herramienta de planificación ha sido satisfactorio. Se ha llegado a cubrir todas las necesidades básicas para ofrecer una planificación de comunicaciones inalámbricas de redes híbridas WiFi+WiMAX. Dado que este proyecto no deja de ser un proyecto fin de carrera y que la herramienta software no es más que una primera versión, se ha visto que los objetivos marcados inicialmente se ha cubierto.

Por fin se dispone de una herramienta de planificación de comunicaciones inalámbricas perfectamente aplicable en redes de zonas rurales de países en vías de desarrollo.

A continuación, se discuten las posibles líneas de futuro que podría tener este trabajo que la intención de que la herramienta tenga más desarrollo en un futuro no muy lejano.

7.1. Futuras Líneas de Trabajo

A raíz del trabajo realizado se abre un abanico de líneas futuras de trabajo.

7.1.1. Mejoras Concretas

Contrastar con datos reales La mejor posible aportación a la herramienta, y a cualquier simulador en realidad, es disponer de datos medidos en campo que permitan estimar la fidelidad del simulador. De ahí, concluir si los valores obtenidos son una cota superior o inferior, el margen de error y demás varemos que se puedan manejar para poder estimar la verosimilitud de los resultados de simulación. También es importante descubrir algún punto crítico del conjunto de las aplicaciones para determinar en que situación las simulaciones son menos fiables.

La parte más interesada en obtener datos reales son las redes de larga distancia WiFi a vida cuenta de que se viola el estándar, es más difícil aún obtener resultados de esta índole.

Los datos a medir son el throughput, el delay y el jitter. Con esos tres estadísticos uno se hace una buena idea del comportamiento de la red.

QoS extremo a extremo WiFi+WiMAX es un tema que se a resuelto de la manera más simple posible. Una conexión directa donde se crear los flujos necesarios en la parte WiMAX y se transmiten en WiFi indistintamente. Es un tema sumamente importante si se quiere trabajar con calidad de servicio. Por lo tanto se abre un línea de posibles implementaciones, como el ya mencionado *diffserv*.

GUI o una interfaz gráfica para manejar la herramienta es un paso que no aporta funcionalidad pero sí un fácil manejo. A la mayoría de desarrolladores puede considerar que hay tareas más prioritarias en las que invertir el tiempo. Un ingeniero con un perfil más enfocado a los usuario, no dudaría en plantearse.

Una primera versión tiene que cumplir los siguientes requisitos:

1. Cargar el fichero `report.txt` que exporta Radio Mobile.
2. Ejecutar los script para convertirlo en un fichero `net-info`.
3. Cargar el fichero `net-info`¹.
4. Montar el escenario (conjunto de flujos) mediante la selección de los campos: nodo origen y destino, junto la tasa de transmisión (opcionalmente: tamaño de paquete).
5. Simular en ns-3 (posibilitando guardar el script generado para ello)².
6. Representar resultados: enseñar la gráfica de variación del throughput en el tiempo (opcionalmente: evolución del retardo).

7.1.2. Mantenimiento

El mantenimiento es una tarea pendiente en mucho proyectos que hace que la gente no se anime a probar diferentes aplicaciones. Hace falta:

1. Verificar si el fichero exportado por Radio Mobile sufre cambios en futuras versiones.
2. Adaptar la herramienta a futuras versiones de ns-3³.

7.1.3. Mejoras Generales

802.16j - Relay Es de especial interés, para el entorno objetivo de trabajo, poder simular estaciones relay, por una parte, para ampliar coberturas y por otra, para abaratar el equipamiento necesario (una estación relay o *Relay Station* podría suplir el trabajo de dos estaciones base)

¹Para el caso de que ya se disponga de uno, no hace falta ejecutar los 2 primeros pasos

²De este modo se puede ejecutar la simulación por consola con todo el potencial añadido del sistema de log, variación de algunos parámetros por línea de comandos, etc.

³Esta fase es conocida como *merging*, durante la fase de desarrollo se ha tenido que hacer constantemente.

La pega, es que para ello, antes que nada, ns-3 lo debe de simular. Tras un sondeo en la lista de correo tanto de usuarios como en la de desarrolladores, se obtuvo la negación de su existencia en el *main road* del módulo WiMAX a corto y medio plazo, de la mano de su desarrollador principal [4].

Ampliación de protocolos inalámbricos que soporta ns-3 pero no la herramienta es una muy buena aportación, cuyo trabajo -superada la curva de aprendizaje- (una vez familiarizados con el entorno de trabajo de ns-3 en C++ y la posterior comprensión de la herramienta) se entiende que no es elevada. Por ejemplo se propone adaptarlo para soportar 802.11n. ⁴

Cualquier aportación de cualquier índole, será bien venida: desde críticas constructivas hasta financiación para la continuación de su desarrollo.

Se prevé que a corto plazo tendrá pequeñas aportaciones a modo de Proyecto Fin de Máster, del Máster Oficial en Redes de Telecomunicación para Países en Desarrollo de la Universidad Rey Juan Carlos I [20], donde varios miembros de la Fundación EHAS imparten clases en el.

El proyecto sigue abierto en <http://code.google.com/p/ns3-wireless-planning/>.

⁴Límite teórico alcanzable: 600Mbps con uso simultaneo de bandas de 2.4 y 5.4GHz.

Apéndice **A**

Presupuesto

En este apéndice se presentan justificados los costes globales de la realización de este Proyecto Fin de Carrera.

En la Tabla [A.1](#) figura el coste personal ¹.

Tabla A.1: *Presupuesto del Proyecto*

Apellidos y nombre	N.I.F.	Categoría	Dedicación hombres mes	Coste hombre mes €	Coste €	Firma
Patxi Azpiroz	-	Ingeniero	12	2.694,54	32.334,48	×
Javier Simó	-	Ingeniero Senior	0.5	4.289,54	2.144,77	×
Simon Pickin	-	Ingeniero Senior	0.1	4.289,54	428,95	×
Total	×	×	<i>12.6</i>	×	<i>34.906,40</i>	×

En la Tabla [A.2](#) se desglosa el trabo del proyectando por fases.

En la Tabla [A.1](#) figura el coste de los equipos y su amortización.

Finalmente se muestra el coste total del presupuesto en la Tabla [A.4](#).

¹Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)

Tabla A.2: *Fases del Proyecto*

<i>Fase</i>	Tarea	Porcentaje del tiempo
<i>Fase 1</i>	<i>Análisis de Simuladores</i>	30
<i>Fase 3</i>	<i>Aprendizaje: ns-2, ns-3</i>	20
<i>Fase 2</i>	<i>Desarrollo del software</i>	40
<i>Fase 3</i>	<i>Documentación: memoria, código y tutorial</i>	10

Tabla A.3: *Equipo*

Descripción y nombre	Coste €	% Uso dedicado al proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imponible
Ordenador portátil	1200	100	12	60	240

Tabla A.4: *Resumen de Costes*

Presupuesto costes totales	Presupuesto costes totales
Personal	34.906,40
Amortización	240
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos (20 %)	7.029,28
Total	42.175,68

Glosario de Términos

Nota: ordenado alfabéticamente

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

4G - 4th Generation

AP - Access Point, dispositivo de red que sirve de Punto de Acceso WiFi

BES - Best Effort Service.

bps - bits por segundo

BS - Base Station

CBR - Constant Bit Rate

CCA - Clear Channel Assessment

CCK - Complementary Code Keying

CID - Connection Identifier

CRC - Cyclic Redundancy Check

CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection

CW - Contention Window

DBPSK - Differential Binary Phase Shift Keying

DCD - Downlink Channel Descriptor

DIFS - Distributed IFS (véase IFS).

DIUC - Downlink Interval Usage Code

DL - Downlink

DL-MAP - Downlink Map

DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying

DSCP - Differentiated Services Code Point

DSSS - Direct-Sequence Spread Speactrum.

EHAS - Enlace Hispano Americano de Saludo

EIFS - Extended IFS (véase IFS).

EIRP - Equivalent Isotropically Radiated Power.

ERP-OFDM - Extended Rate Physical layer - OFDM (véase OFDM).

ertPS - Extended Real-Time Polling Service ¹.

FCH - Frame Control Header

FFT - Fast Fourier Transform

FHSS - Frequency Hopping Spread Speactrum (véase también DSSS).

FTP - File Transfer Protocol.

HF/VHF/UHF - High Frequency - Very HF - Ultra HF

HR/DSSS - High Rate DSSS (véase DSSS).

IE - Information Element

IEEE - Institute of Electrical & Electronics Engineers

IFS - Interframe Space

IP - Internet Protocol

IR - Infrarrojos

LoS - Line of Sighth, Línea de vista.

LTE - Long Term Evolution

MAC - Medium Access Control.

Mbps - Mega bits por segundo

MPDU - MAC Protocol Data Unit (véase MAC).

NAV - Network Allocator Vector

nrtPS - Non Real-Time Polling Service.

OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access (véase también OFDM).

ONGD - Organización de No Gubernamental de Desarrollo

PFC - Proyecto Fin de Carrera.

¹El servicio de planificación ertPS es opcional por lo que no todos los sistemas lo implementan.

- PIFS - Point Coordination IFS (véase IFS).
- PIRE - Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, (EIRP en inglés)
- PLCP - Physical Layer Convergence Procedure
- PMD - Physical Medium Dependent
- PPDU - PLCP Protocol Data Unit
- QoS - Quality of Service, Calidad de Servicio.
- REG - Register
- REQ - Request
- RNG - Ranging
- RSP - Response
- rtPS - Real-Time Polling Service.
- RTS/CTS - Request to Send/Clear to Send
- SIFS - Short Inter Frame Space (véase IFS).
- SNR - Signal to Noise Ratio
- SS - Subscriber Station
- STA - Station, dispositivo de red puede usar el protocolo 802.11.
- TCID - Transport Connection Identifier.
- TIC - Tecnologías de la Ciencia e Información
- UCD - Uplink Channel Descriptor
- UGS - Unsolicited Grant Service.
- UIUC - Uplink Interval Usage Code
- UL-MAP - Downlink Map
- UP - Uplink
- VoIP - Voice over IP (Internet Protocol)
- WiFi - Wireless Fidelity, estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE802.11.
- WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access, estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE802.16.
- WMAN - Wireless Metropolitan Area Network

Bibliografía

- [1] Integrating real world applications into OMNeT++.
- [2] Wimax forum. <http://www.wimaxforum.org>.
- [3] R. Agüero and J. Pérez. Multi interface support. <http://personales.unican.es/aguerocr/files/ucMultiIfacesSupport.pdf>.
- [4] I. Amine. ns-3 wimax development tree. <http://code.nsnam.org/iamine/ns-3-wimax/>. amine.ismail@sophia.inria.fr.
- [5] A. Ariza. INEMANET Framework for OMNeT++. <http://github.com/inetmanet/inetmanet/tree/master>.
- [6] B. Bartosz and P. Machan. Ns-2 trace analyzer. <http://sourceforge.net/projects/trace-analyzer/>.
- [7] M. Carlberg and A. Dammander. Wimax - a study of mobility and a mac-layer implementation in glomosim. <http://www.cs.umu.se/education/examina/Rapporter/CarlbergDammander.pdf>.
- [8] C. Casetti. 802.11e implementation for the ns simulator. <http://www.telematica.polito.it/casetti/802.11e>.
- [9] T. Chiueh, A. Raniwala, R. Krishnan, and K. Gopalan. Hyacinth: An ieee 802.11-based multi-channel wireless mesh network. <http://www.ecsl.cs.sunysb.edu/multichannel/>.
- [10] M. Cloran. Simulation of ieee 802.11 pcf function in glomosim. <http://elm.eeng.dcu.ie/~murphys/projects/MichaelCloran-FinalReport.pdf>.

- [11] R. Coudé. Radio mobile. <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>. Accedido el 20 Enero 2009.
- [12] CSIE. The design and implementation of wimax module for ns-2 simulator. http://ndsl.csie.cgu.edu.tw/wimax_ns2.php.
- [13] U. T. de Berlín. Parallel simulations. http://www-tnk.ee.tu-berlin.de/research/ns-2_akaroa-2/ns.html.
- [14] U. de Padua. Miracle. <http://www.dei.unipd.it/wdyn/?IDsezione=3966>.
- [15] I. I. o. T. Department of Computer Science & Engineering. The enhanced network simulator. <http://www.cse.iitk.ac.in/users/braman/tens/>.
- [16] U. M. Department of Distributed Systems. Ns-2 emulation extensions. <http://www-ivs.cs.uni-magdeburg.de/EuK/forschung/projekte/nse/>.
- [17] M. developers. MiXiM project. <http://mixim.sourceforge.net/>.
- [18] F. EHAS. Enlace hispanoamericano de salud. <http://www.ahas.org>.
- [19] elpais.com. Cisco deja de fabricar estaciones para wimax. http://www.elpais.com/articulo/tecnologia/Cisco/deja/fabricar/estaciones/WiMax/elpeputec/20100309elpeputec_2/Tes.
- [20] elpais.com. Compad - máster oficial en redes de telecomunicación para países en desarrollo de la urjc. <http://www.tsc.urjc.es/Master/COMPAD/presentacion.html>.
- [21] D. Emma, R. Canonino, and G. Ventre. Extended nam editor. <http://www.grid.unina.it/grid/ExtendedNamEditor/index.html>.
- [22] E. A.-S. et al. Ns-2 workbench project. <http://www.mnlab.cs.depaul.edu/projects/nsbench/>.
- [23] J. Farooq. Implementation and evaluation of ieee 802.11e wireless lan in glomosim. <http://www.jahanzeb.com/download/masterthesissummary.pdf>.
- [24] J. Farooq. Latest release of ns-3 wimax module. <http://mailman.isi.edu/pipermail/ns-developers/2008-September/004789.html>.

- [25] J. Farooq and T. Turletti. An ieeee 802.16 wimax module for the ns-3 simulator. <http://planete.inria.fr/software/WiMAX-ns-3/>.
- [26] J. Farooq and T. Turletti. An IEEE 802.16 WiMAX Module for the NS-3 Simulator. Technical report, 2008.
- [27] N. Forum. 802.11g wifi protocol is supported? <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw/phpBB/viewtopic.php?f=2&t=57>.
- [28] GloMoSim. Glomosim. <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [29] GNU. La definición de software libre. <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>.
- [30] T. N. Group. Ieee802.11e for the ns-2 simulator. http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2.
- [31] W. N. R. Group. Network simulation cradle. <http://research.wand.net.nz/software/nsc.php>.
- [32] G. P. T. Henderson. 802.11b phy models and validation. <http://www.nsnam.org/workshops/wns3-2009/talks/pei-80211phy.pdf>.
- [33] IEEE 802.11. IEEE 802.11-2007 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Computer Society., 1999.
- [34] S. Inc. OMNEST - The R&D Simulator. <http://www.omnest.com>.
- [35] Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society. *802.16-2009 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Wireless Access Systems*. IEEE Computer Society, 2009.
- [36] J-Sim. J-sim. <http://sites.google.com/site/jsimofficial/>.
- [37] A. Kassler. ns-2 wimax port for multihomed nodes available. <http://mailman.isi.edu/pipermail/ns-developers/2008-March/003865.html>.
- [38] C. N. Laboratoty. Wimax module for the ns-2 simulator. http://www.lrc.ic.unicamp.br/wimax_ns2/.

- [54] N. I. of Standards and Technology. Nist. <http://www.antd.nist.gov/seamlessandsecure/pubtool.shtml>.
- [55] OMNet++. IEEE 802.11 INET Patch. <http://upload.ttnz.cz/readfile.php?file=horal/802.11e/ieee802.11-INETpatch-1.0.tar.bz2>.
- [56] OMNet++. INET Framework for OMNeT++. <http://inet.omnetpp.org>.
- [57] OMNet++. OMNeT++. <http://www.omnetpp.org/>.
- [58] OMNet++. OppBSD. <http://www.omnetpp.org/pmwiki/index.php?n=Main.OppBSD>.
- [59] OMNet++. Setting up parallel simulations. <http://www.omnetpp.org/pmwiki/index.php?n=Main.SettingUpParallelDistributedSimulations>.
- [60] L. Paquereau. Extensions to ns-2. <http://www.q2s.ntnu.no/~paquerea/ns.php>.
- [61] N. Qiang. ns-802.11e edcf for ieee 802.11e wireless lan. <http://www-sop.inria.fr/planete/qni/Research.html#ns>.
- [62] G. Riley and A. Park. Pdns - parallel/distributed ns. <http://www.cc.gatech.edu/computing/compass/pdns/index.html>.
- [63] J. Russelot. Mobility Framework for OMNeT++. <http://mobility-fw.sourceforge.net/>.
- [64] A. Sanchez. How to install nctuns in debian/ubuntu. http://wiki.ehas.org/index.php?title=How_to_install_NCTUns_in_Debian/Ubuntu.
- [65] J. Simó, C. Figuera, J. Seoane, and A. Martínez. Distance Limits in IEEE 802.11 for Rural Networks in Developing Countries. In *proc. IEEE WRECOM*, 2007.
- [66] SPLAT. Splat. <http://splat.ecok.edu/>.
- [67] SSFNet. Ssfnet. <http://www.ssfnet.org/homePage.html>.
- [68] G. Tech. Gtnets. <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/>.
- [69] Trac. Modified INET. <http://trac.titusac.de/inet-mod>.
- [70] C. University. Jist/swans. <http://jist.ece.cornell.edu/>.

- [71] Wikipedia. 802.11e implementation for the ns simulator. http://en.wikipedia.org/wiki/Nakagami_fading.
- [72] WiNe. WiNe. <http://www.winehq.org/>,.
- [73] P. Wu. Nsg2. <http://sites.google.com/site/pengjungwu/nsg>.