







**POLITÉCNICA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS  
DE ENRUTAMIENTO DE REDES MALLADAS INALÁMBRICAS  
EN ENTORNOS RURALES**

AUTOR: D. ESTEBAN MUNICIO HERNÁNDEZ

TUTOR: D. MANUEL LAMBEA OLGADO

**TRIBUNAL:**

PRESIDENTE: D. MANUEL LAMBEA OLGADO

VOCAL: D. MANUEL SIERRA CASTAÑER

SECRETARIO: D. CARLOS DEL CAÑIZO NADAL

SUPLENTE: D<sup>a</sup>. MARÍA JESÚS LEDESMA CARBAYO

Fecha de lectura:

Calificación:



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS  
DE ENRUTAMIENTO DE REDES MALLADAS INALÁMBRICAS  
EN ENTORNOS RURALES**

**ESTEBAN MUNICIO HERNÁNDEZ**

**2013**



*”No es posible que tres familias tengan rentas superiores a la suma de los PIB de los 48 países más pobres. No se puede hablar de equidad y justicia social mientras se perpetúe esta situación. Estados Unidos y Europa consumen de media 8,4 veces más que la media mundial. Es necesario que bajen su nivel de consumo y reconozcan que todos somos huéspedes de una misma tierra, de la misma Pachamama. Yo sé que no es fácil conseguir semejante cambio cuando un sector extremadamente poderoso es invitado a renunciar a sus extraordinarios beneficios para que sobreviva el planeta tierra. En mi propio país, yo sufro a pie firme ese sabotaje permanente para que sean mantenidos privilegios, porque estamos a punto de acabar con estos últimos, para que todos podamos ‘vivir bien’ y no mejor que nuestros semejantes. Se que el cambio en el mundo es mucho más difícil que en mi país, pero tengo una absoluta confianza en el ser humano, en su capacidad de razonar, de aprender de sus errores, de reencontrar sus raíces y de cambiar para forjar un mundo justo, diverso, integrador, equilibrado y armonioso con la naturaleza”*

Evo Morales, Septiembre 2008  
Asamblea General de las Naciones Unidas





## ***Agradecimientos***

*A mi familia, que desde el principio me han apoyado para embarcarme en esta aventura.*

*A todos los que han hecho posible que haya podido realizar este proyecto, entre ellos Manuel Sierra, Daniel Díaz y Manuel Lambea.*

*A los compañeros del Área de Tecnologías de Acceso y Radiopropagación de INICTEL-UNI que han hecho que el trabajo sea muy agradable y ameno.*

*A los nuevos amigos y los antiguos, que me han echo disfrutar de cada momento en mi estancia en Perú.*



## Resumen

Este proyecto surge de la problemática de llevar las tecnologías de la información a las zonas más alejadas e inaccesibles, donde generalmente se dan los mayores índices de pobreza. Para ello se propone el estudio de la viabilidad de las redes malladas inalámbricas aplicadas en entornos rurales. Las redes malladas tienen una filosofía distribuida que permite mayores coberturas con un menor presupuesto, además de ofrecer una mayor seguridad en caso de catástrofes y una gran independencia de las grandes redes de los proveedores de Internet. Esto hace que puedan ser una interesante alternativa a las redes de comunicación inalámbrica convencionales.

En primer lugar se intenta analizar cuáles son los protocolos de encaminamiento más adecuados para redes malladas en este tipo de escenarios rurales, donde el medio inalámbrico es adverso e inestable y la logística es más complicada. En concreto, se ha desplegado para su posterior estudio, una red experimental rural en un entorno altoandino. En dicha red se comparan dos soluciones de encaminamiento de código abierto, Batman-adv y IEEE 802.11s.

Adicionalmente, el proyecto intentará difundir la tecnología y transferir los conocimientos aprendidos a través de diversos talleres de capacitación, un artículo técnico sobre la comparación de las prestaciones Batman-adv y IEEE 802.11s, y la creación de un proyecto de red comunitaria libre llamado MESH-RURAL, el cual facilitará la implementación de redes malladas inalámbricas con estas dos soluciones de encaminamiento.



# Índice general

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1	Motivación	3
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo General	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Metodología	4
1.4	Planificación del proyecto	6
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1	Introducción	7
2.2	Contexto y antecedentes	8
2.2.1	La importancia de las redes de comunicación para el desarrollo	9
2.2.2	La problemática de las TIC en las zonas rurales y aisladas en el Perú	10
2.3	Redes inalámbricas malladas	12
2.3.1	Definición	12
2.3.2	Problemática de las redes malladas	14
2.3.3	Protocolos de encaminamiento	15
	A) OLSR	18
	B) Batman-adv	19
	C) IEEE 802.11s	21
2.3.4	Comparación preliminar de protocolos	26
2.4	Aplicación de redes malladas en zonas rurales	28
2.4.1	Ejemplo de aplicación de redes malladas: Redes Libres Comunitarias	29
2.5	Conclusiones	31
<b>3</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>33</b>
3.1	Introducción	33
3.2	Hardware y Software usado	34
3.3	Configuración de protocolos 802.11s y Batman-adv en los equipos	36
3.4	Definición de pruebas y variables de interés	36
3.5	Pruebas en laboratorio	38

3.6	Pruebas en terreno: Huancavelica-Lachoc	39
3.6.1	Contexto y descripción del escenario	39
3.6.2	Descripción del escenario	42
3.6.3	Despliegue y realización de pruebas	43
3.7	Conclusiones y resultados preliminares	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>47</b>
4.1	Comparación del comportamiento de Batman-adv y 802.11s	47
4.2	Conclusiones del análisis	56
<b>5</b>	<b>DIVULGACIÓN DEL TRABAJO DESARROLLADO</b>	<b>59</b>
5.1	Proyecto MESH-RURAL	59
5.2	Talleres de capacitación en telecomunicaciones rurales	63
5.2.1	I Jornada de Telecomunicaciones Rurales de INICTEL-UNI	63
5.2.2	Taller de Telecomunicaciones Rurales para la FIEE	65
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>69</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>71</b>
A	Manuales para creación de imágenes de OpenWrt	73
B	Manuales para la instalación y configuración de redes malladas con los protocolos de encaminamiento Batman- adv y 802.11s	79
C	Artículo técnico. Comparación de protocolos	105
D	Manuales de capacitación en telecomunicaciones rurales	111
D.1	Manual I Jornada de Telecomunicaciones Rurales INICTEL-UNI	111
D.2	Manual Taller de Comunicaciones Rurales para la FIEE-UNI	151
E	Datasheet Ubiquiti Nanostation M5	187
F	Scripts y ficheros de interés	191
	<b>Bibliografía</b>	<b>199</b>

# Lista de Figuras

2.1	Ejemplo de topología ad-hoc . . . . .	13
2.2	Ejemplo de red mesh . . . . .	14
2.3	Inundación tradicional vs Inundación optimizada . . . . .	18
2.4	Mecanismo de selección de rutas de B.A.T.M.A.N . . . . .	20
2.5	Ejemplo de red mallada inalámbrica 802.11s . . . . .	22
2.6	Encaminamiento 802.11s modo bajo demanda . . . . .	23
2.7	Encaminamiento 802.11s modo root . . . . .	24
2.8	Matriz comparativa de protocolos . . . . .	27
3.1	Escenario de prueba enlace óptimo . . . . .	38
3.2	Rendimiento para un enlace trabajando con Batman-adv . . . . .	38
3.3	Rendimiento para un enlace trabajando con 802.11s . . . . .	39
3.4	Región de Huancavelica . . . . .	40
3.5	Centro de Investigación y Desarrollo de camélidos sudamericanos	41
3.6	Escenario de la red mallada inalámbrica experimental . . . . .	42
3.7	Topología de la red mallada inalámbrica experimental . . . . .	43
3.8	Vista desde el nodo Casa4 . . . . .	45
4.1	Rutas usadas para la medición del retardo . . . . .	50
4.2	Acumulación de retardo por número de saltos en la ruta Ping corto 1 . . . . .	51
4.3	Acumulación de retardo por número de saltos en la ruta Ping corto 2 . . . . .	51
4.4	Acumulación de retardo por número de saltos en la ruta Ping largo 1 . . . . .	52
4.5	Variación del <i>throughput</i> máximo según el número de saltos . . . . .	53
4.6	Variación del <i>jitter</i> promedio según el número de saltos . . . . .	54
4.7	Prueba de videollamada entre computadoras usando Ekiga . . . . .	55
4.8	Prueba de conectividad entre una computadora y un equipo RFID . . . . .	56
D.1	I Jornada de Telecomunicaciones rurales INICTEL-UNI . . . . .	111
D.2	Taller de telecomunicaciones rurales FIEE . . . . .	151

# Lista de Tablas

3.1	Datos de la ubicación de las antenas . . . . .	44
3.2	Longitud de cada enlace de la red . . . . .	44
3.3	Potencias recibidas de cada antena . . . . .	44
4.1	Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa2 . . . . .	47
4.2	Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa3 . . . . .	48
4.3	Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa4 . . . . .	48
4.4	Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa5 . . . . .	48
4.5	Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa2 . . . . .	49
4.6	Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa3 . . . . .	49
4.7	Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa4 . . . . .	49
4.8	Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa5 . . . . .	49
4.9	Retardos obtenidos por salto . . . . .	52
4.10	<i>Throughput</i> en Mbps obtenidos hacia las tres computadoras desde Equipo1 . . . . .	53
4.11	Mediciones de <i>jitter</i> en milisegundos obtenidas hacia las tres computadoras desde Equipo1 . . . . .	54



# Glosario

**ABR** - Associativity-Based Routing ABR  
**ALOHANET** - Aloha Network  
**AODV** - Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing  
**ARPANET** - Advanced Research Projects Agency Network  
**BATMAN** - Better Approach To Mobile Adhoc Networking  
**BSSID** - Basic Service Set Identifier  
**DHCP** - Dynamic Host Configuration Protocol  
**DSR** - Dynamic Source Routing  
**EXT** - Expected Transmission Count  
**FIEE** - Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
**HWMP** - Hybrid Wireless Mesh Protocol  
**IP** - Internet Protocol  
**ISP** - Internet Service Provider  
**LAN** - Local Area Network  
**MAC** - Media Acces Control  
**MANET** - Mobile Ad-hoc Networks  
**MCS** - Modulation and Coding Scheme  
**MPR** - Multipoint Relays  
**NAT** - Network Address Translation  
**OGM** - Originator Messages  
**OLSR** - Optimized Link State Routing  
**OSPF** - Open Shortest Path First  
**OSI** - Open System Interconnection  
**POE** - Power Over Ethernet  
**PRNET** - Packet Radio Network  
**QOS** - Quality of Service  
**QPSK** - Quaternary Phase Shift Keying  
**RFC** - Request For Comments  
**RFID** - Radio Frequency IDentification  
**RIP** - Routing Information Protocol  
**SATNET** - Atlantic Packet Satellite Network  
**SSID** - Service Set Identifier  
**TIC** - Tecnologías de Información y Comunicación  
**TTL** - Time To Live  
**UDP** - User Datagram Protocol  
**UTP** - Unshielded Twisted Pair  
**URSI** - Union Radio Science International  
**VoIP** - Voice over IP



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

Este proyecto surge de una relación internacional entre la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) de España, a través de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Perú, a través de su Instituto de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL-UNI). Las relaciones entre la ETSIT y INICTEL-UNI están enmarcadas dentro de un acuerdo de cooperación internacional donde ambas entidades se benefician mediante la transferencia de conocimiento bi-direccional a través del intercambio de alumnos y financiación conjunta de proyectos de desarrollo.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del proyecto es demostrar la aplicabilidad y conveniencia de soluciones inalámbricas malladas en entornos rurales del Perú.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Se han propuesto cuatro objetivos específicos:

- Realizar un estudio comparativo de protocolos de encaminamiento
- Implementar una red mallada inalámbrica experimental que de servicio a otros proyectos TIC en un escenario altoandino peruano.
- Definir el protocolo de encaminamiento más conveniente de ser configurado en una red inalámbrica mallada en un entorno rural.
- Definir y detallar el proceso de configuración de equipos inalámbricos con protocolos de encaminamiento en redes malladas
- Difusión y transferencia de la tecnología relacionada con las redes inalámbricas malladas para su aplicación en zonas rurales mediante diversos talleres de capacitación

## 1.3. Metodología

Para lograr estos objetivos, se plantea una metodología basada en trabajo de laboratorio, trabajo de campo y formación y capacitación.

- El trabajo de laboratorio se realizará en el Área de Tecnologías de Acceso y Radiopropagación de la Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico de INICTEL-UNI y consistirá en el estudio teórico de las redes malladas inalámbricas, así como de un análisis de los resultados obtenidos a lo largo del proyecto. También se realizarán pruebas con el hardware para probar distintas configuraciones y pruebas del rendimiento de la antenas en entornos cerrados.
- El trabajo de campo consistirá en el despliegue e implementación de una red mallada inalámbrica en un entorno rural para la posterior elaboración de pruebas sobre ella. Esta fase de trabajo también incluye los desplazamientos a las zonas rurales.

- 
- La formación y capacitación sobre las TIC en entornos rurales se realizará en las aulas de capacitación de INICTEL-UNI. Los talleres de capacitación también tienen una parte práctica que se desarrolla en las instalaciones deportivas de INICTEL-UNI debido a la necesidad de uso de espacios al aire libre.

## 1.4. Planificación del proyecto

En el desarrollo del proyecto se seguirá la siguiente planificación:

- **Estudio teórico.** Esta tarea se realizará al comienzo del proyecto, teniendo una duración aproximada de 2 meses. Se realizará un estudio sobre el estado del arte respecto a las redes malladas inalámbricas, adquiriendo información sobre el estado actual de las tecnologías y sus posibilidades de implementación.
- **Implementación.** Esta tarea consistirá en la preparación y configuración de los equipos inalámbricos, así como realización de pruebas con los mismos, tanto en entornos de laboratorio como en entornos reales. Se estima que la duración de esta tarea sea de 2 meses.
- **Resultados y análisis.** En esta tarea se analizarán los datos tomados en la fase de implementación y se obtendrán resultados objetivos sobre la implementación. La duración aproximada de esta fase será de 1 mes.
- **Divulgación del trabajo desarrollado.** En esta fase del proyecto se realizarán diversos cursos de capacitación, y se creará el proyecto de red comunitaria libre de INICTEL-UNI llamado MESH-RURAL. La duración estimada de esta fase será de 1 mes.

# Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. Introducción

Las TIC avanzan rápidamente generando nuevos horizontes y nuevas posibilidades y mejorando la calidad de vida de muchas personas. Pero generalmente estas mejoras no se transfieren a la población mundial de igual manera, haciendo cada vez mayor la llamada Brecha Digital[1]. Las diferencias entre los países desarrollados y los países más empobrecidos hacen que sus poblaciones sean muy diferentes socioeconómicamente y que estas diferencias se acentúen conforme aumenta la brecha digital. Este hecho cobra una mayor importancia debido a que se prevé que el 85 % de la población mundial vivirá en países con índice de desarrollo bajo en el 2030[2]. Por este motivo es necesario poseer un pensamiento global, tener en cuenta la situación de los diferentes países y tratar de garantizar el acceso de la población a las TIC de la manera mas equitativa posible. Pero debido a esta diferencia socioeconómica existente entre los países, las necesidades de cada población hacen que el acceso a las TIC sea diferente en cada uno de ellos. Por ello es necesario adaptar las TIC a las necesidades de cada sector de la población.

Históricamente, uno de los sectores más desfavorecidos ha sido la población rural. En prácticamente todos los países se dan movimientos migratorios desde al campo hacia las ciudades, siendo estos flujos de mayor intensidad en los países más pobres. En la actualidad cada día se añaden casi 180 000 personas a la población urbana mundial[2]. Esto crea una situación que a largo plazo se perfila claramente insostenible debido a que en los países en vías de desarrollo, el aumento de población urbana implica un aumento generalizado de pobreza, así como problemas de índole política, energética y ecológica. Por este motivo, este proyecto se centra en mejorar el acceso a las TIC en las zonas rurales de los países más desfavorecidos, ayudando a frenar estos flujos migratorios.

## 2.2. Contexto y antecedentes

El proyecto se ha ideado y desarrollado en Perú, dentro de un acuerdo entre la UPM e INICTEL-UNI, e indirectamente la UNI. El proyecto está alineado en cierta medida con las prioridades de cooperación internacional españolas reflejadas en el Plan Director de la Cooperación Española Internacional 2009-2012 [3] y así como de las políticas de desarrollo territorial de Perú reflejadas en el Plan Nacional de Desarrollo Territorial 2004-2013 de Perú[4]. Perú es uno de los países receptores de ayuda al desarrollo en América Latina (clasificado como País de Bajo Ingreso/ País de Renta Media Baja). Mediante estas políticas se pretende que Perú frene la emigración desde las zonas rurales hacia las grandes ciudades de forma que exista un crecimiento distribuido. Desde el punto de vista de las prioridades horizontales, se fomenta la inclusión social y la lucha contra la pobreza como objetivos finales así como la búsqueda de sostenibilidad ambiental y respeto a la diversidad cultural.

Indirectamente se contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)[5], especialmente en el objetivo n° 7 (Garantizar el sustento del medio ambiente) y el objetivo n° 8 (Fomentar una asociación mundial para el desarrollo), aunque también influye indirectamente en otros objetivos como el objetivo n° 2 (Lograr la enseñanza primaria universal).



### **2.2.1. La importancia de las redes de comunicación para el desarrollo**

Actualmente las TIC están comenzando a representar uno de los factores más importantes en casi todos los ámbitos de un país: social, económico, cultural, político, educativo, medioambiental, etc. . .

Para lograr un desarrollo rural a largo plazo, cualquier política debe de ir acompañada de un modelo de desarrollo territorial TIC que se ajuste a las necesidades de cada región.

A medida que las TIC avanzan, los países más desarrollados se vuelven más competitivos y eficientes, haciendo que la situación de desigualdad entre países desarrollados y los países en vías de desarrollo entre en un círculo vicioso. Reduciendo esta brecha digital, se logra mejorar los procesos de producción de estas regiones, fundamentalmente agrícolas y ganaderas, lo que implica una mejora de vida de su población. Concretamente, las TIC son realmente importantes en Perú, ya que muchas de las regiones rurales además de tener economías ganaderas y agrícolas, dependen de otros sectores como el minero o el turístico. Este modelo cobra una mayor importancia en las regiones más aisladas, donde los servicios de sanidad y educación nacionales (y mucho menos los privados) llegan con gran dificultad.

Desde el punto de vista del desarrollo, las TIC no son un objetivo en sí mismo, si no una valiosa herramienta para lograr otros objetivos. Una red con una infraestructura TIC adecuada presente en pequeñas aldeas puede generar un importante soporte para posteriores proyectos de desarrollo. En ella se pueden implementar programas de tele-educación y tele-medicina para las zonas más aisladas cuyos beneficios revertirían directamente en los ciudadanos, así como programas que mejoren los servicios públicos y la gobernabilidad regional, reduciendo la corrupción y haciendo más eficientes las inversiones del gobierno. También ayudaría a la iniciativa privada, tanto a los trabajadores locales por cuenta propia dedicados al sector servicios, a las pequeñas empresas y a los posibles inversionistas privados. Muy importante sería el papel de las TIC en la mejora de los procesos de producción de los campesinos y ganaderos, ayudándoles con la monitorización y gestión de cultivos y ganado, así como minimizando intermediarios y fijando precios más justos. Independientemente de los proyectos de desarrollo, una infraestructura TIC proveería de servicios de comunicación a una comunidad rural, realmente valorados por la población. Estas infraestructuras no solo son capaces de dar servicios de telefonía y conexión a Internet hacia un ISP, sino que tienen la capacidad de crear redes comunitarias alternativas capaces de ofrecer dichos servicios sin necesidad de la intervención de gobiernos o grandes teleoperadoras, lo que además de otorgar una mayor libertad a la región, puede reducir enormemente los gastos de la población en materia de comunicación y obtención de información.

Por estas razones, se considera importante dar cobertura y acceso a las tecnologías de la información a las áreas rurales, ya que, en el caso de Perú, estas áreas, contienen al 40 % de la población y donde un 70 % de esta población residente en zonas rurales, se encuentra en situación de pobreza.[6]

### 2.2.2. La problemática de las TIC en las zonas rurales y aisladas en el Perú

Sin embargo, el despliegue de infraestructura TIC en zonas rurales se considera costoso y complicado, y es el despliegue y mantenimiento de las redes de telecomunicación la parte que ofrece mayores dificultades. La implementación de redes de telecomunicación terrestres se torna a veces inviable no solo económica, sino también físicamente. Es por eso que actualmente, algunas de estas comunidades aisladas tienen establecidos enlaces por satélite debido a las complicaciones y altos costes inherentes de las redes terrestres en este tipo de escenarios. Las comunicaciones por satélite a corto plazo son más sencillas y baratas que las comunicaciones terrestres, pero a largo plazo son bastante más costosas, haciendo que sea insostenible económicamente mantener enlaces de este tipo en las comunidades con menos recursos.

En las zonas urbanas, la elección de la ubicación de los nodos, así como de su mantenimiento, se torna más sencillo. Esto es debido a que por un lado el uso de enlaces cableados u ópticos es totalmente viable y simplifica en gran medida el dimensionamiento, despliegue y mantenimiento de la red. Por otro lado, el diseño de los enlaces inalámbricos responde únicamente a modelos de propagación ampliamente conocidos y estudiados como el de Okumura-Hata. También se tienen en cuenta otros aspectos en el ámbito económico, como el alquiler de suelo y el acceso a la energía, que raramente suele ser un problema.

Sin embargo en las zonas rurales, especialmente en las regiones altoandinas, *ceja de selva* o selva alta y selva, existen numerosos factores que dificultan el despliegue y mantenimiento de una red. Por un lado, el acceso a la energía está ubicado en determinados puntos localizados en lugares donde no siempre es conveniente colocar un nodo de la red. Esto hace que la energía sea uno de los principales inconvenientes a la hora de diseñar una red de telecomunicaciones. Actualmente muchos de los nodos disponen de energía gracias a diversas fuentes de energía de origen renovable, como la solar fotovoltaica, la eólica o incluso la mini-hidráulica.

El carácter aislado que tienen muchas de las regiones rurales del Perú implica que la red tenga que abarcar grandes distancias. Esto hace que a la hora de diseñar la red, los enlaces ópticos o cableados se descarten por su alto coste y generalmente se establezcan enlaces de larga distancia para minimizar

el número de repetidores necesarios, reduciendo así los costes. Estos enlaces de larga distancia, que dependiendo de la geografía y el tipo de terreno pueden llegar a ser de decenas de kilómetros de longitud, generalmente necesitan potencias altas y sus velocidades de transmisión son algo limitadas. Esto hace que los nodos tengan unos requerimientos energéticos elevados y que las velocidades estén en el orden de unas pocas decenas de Mbps.

En el caso de Perú, muchas de las zonas rurales están ubicadas en entornos muy agrestes, como por ejemplo las zonas selváticas o de alta montaña. En este tipo de escenarios, generalmente las inclemencias meteorológicas son en gran medida adversas. Dichas zonas sufren grandes precipitaciones en la época de lluvias, que dura desde el mes diciembre al mes marzo. Estas lluvias frecuentemente provocan inundaciones y corrimientos de tierra, también llamados *huaicos* y aunque generalmente los asentamientos no suelen sufrir grandes daños, otras infraestructuras como puentes, torres de alta tensión y antenas de comunicaciones sí resultan dañadas. Esto hace que las ubicaciones de los nodos deban ser correctamente estudiadas por técnicos e ingenieros especializados en construcción civil con experiencia en este tipo de entornos. También es necesario mencionar que Perú posee una elevada actividad sísmica debido a las numerosas fallas geológicas que recorren su territorio. Este tipo de accidentes geográficos ha de ser tenido en cuenta también a la hora de ubicar nodos, especialmente aquellos cuyas antenas necesiten grandes torres de sustentación.

El efecto de estas condiciones adversas sobre las redes, se refleja en un cambio de topología en la red debido a la creación de indisponibilidades en enlaces y nodos. Estas indisponibilidades son de gran importancia en las redes rurales, debido que el mantenimiento es escaso y difícil, por lo que un fallo de red puede perdurar bastante tiempo hasta que pueda ser solventado.

## 2.3. Redes inalámbricas malladas

La mayoría de las redes inalámbricas actuales dependen en gran medida de la presencia de un punto de acceso. Una red basada en puntos de acceso se dice que opera en modo infraestructura, donde el punto de acceso opera como *maestro*, y el resto de los equipos como *clientes*. Este tipo de tecnología es la más extendida en las zonas urbanas, lo que permite al usuario de esas áreas ubicarse siempre cerca de un punto de acceso. Sin embargo, los puntos de acceso no son un elemento esencial de las redes inalámbricas y su utilidad es limitada en zonas poco pobladas. Un modo de operación alternativo es el modo *ad-hoc*.

Este proyecto pretende estudiar un tipo de red *ad-hoc*, las redes malladas inalámbricas, en aquellos entornos donde las redes de comunicaciones en modo infraestructura suelen presentar grandes problemas. Por eso antes de comenzar a analizar su viabilidad en este tipo de escenarios, procederemos a la definición y estudio de las redes malladas inalámbricas.

### 2.3.1. Definición

Una red *ad-hoc* es aquella en la cual los equipos pueden establecer conexiones directamente los unos con los otros sin la necesidad de la existencia de un punto de acceso en la red. El hecho de que todos los nodos se puedan interconectar directamente las convierte en redes distribuidas que no necesitan dispositivos especiales que centralicen la gestión de red. Los nodos de una red *ad-hoc* operan como *maestro* y *cliente* simultáneamente, estableciendo enlaces igual-a-igual con el resto de nodos. Las primeras redes *ad-hoc* fueron ALOHANET y PRNET, las cuales fueron desarrolladas por la agencia estadounidense DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) en los años 70. En la Figura 2.1 podemos ver un ejemplo de una red *ad-hoc*.

Existen varios tipos de redes *ad-hoc* las cuales añaden características especiales a esta definición. Las más importantes son las *Redes móviles Ad-hoc* o *MANETs* (*Mobile Ad-hoc Networks*), las cuales están formadas por un conjunto de nodos móviles e inalámbricos, las *Redes de Sensores*, formadas por nodos cuyos recursos son muy limitados y las *Redes Malladas* o también llamadas *Redes Mesh*, en las cuales se centrará este proyecto. Concretamente nos centraremos en las redes malladas inalámbricas, aunque también se contemplará la posibilidad de que algunos de los enlaces puedan trabajar con otras tecnologías como 802.3 (Ethernet), cable modems, etc. . .

Las redes malladas inalámbricas generalmente combinan las características de las redes *ad-hoc* y las de modo infraestructura. La base de una red mallada

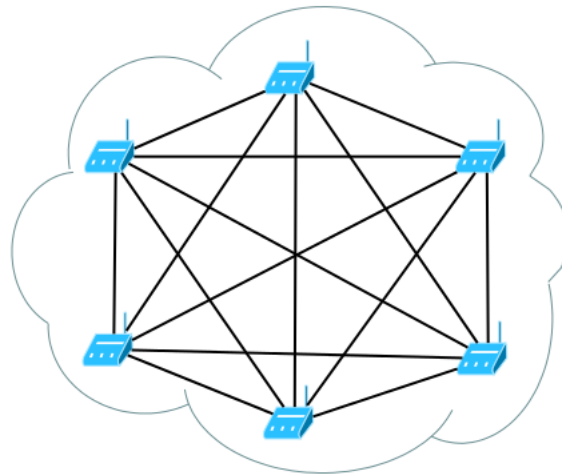


Figura 2.1: Ejemplo de topología ad-hoc

es principalmente la de una red *ad-hoc*. Los nodos de la red se interconectan inalámbricamente de forma distribuida y sin una estructura determinada, de manera que no existen elementos centrales que gestionen el funcionamiento y el tráfico de datos. Sin embargo, las redes malladas incluyen la característica de que, aparte de los nodos básicos, algunos de los nodos puedan a la vez funcionar en modo infraestructura, actuando en una de sus interfaces como punto de acceso. Esto hace posible extender y compartir la conectividad inalámbrica de manera distribuida, pero facilitando el acceso a los equipos de usuario ya sea con subredes inalámbricas o cableadas. También se incluye en algunos nodos la capacidad de que puedan funcionar como pasarela hacia redes externas. Un ejemplo de una red mallada se muestra en la Figura 2.2.

De forma general, podemos reducir las ventajas de las redes malladas a:

- Permiten desplegar redes rápidamente y de forma automática, reduciendo bastante los costes de conexión de la red con otros sistemas autónomos proporcionando una red de retorno o *backhaul* de bajo coste. Las *backhaul* son redes intermedias que unen el núcleo de red de un sistema autónomo con sus subredes periféricas.
- Dan acceso fácilmente en áreas donde las redes fijas son costosas o imposibles, incluyendo zonas aisladas sin línea de vista
- Son escalables y resistentes a cambios de topología y caídas de enlaces debido a su naturaleza distribuida
- Capacidad de dar gran cobertura con pocos nodos debido al encaminamiento multi-salto y garantizan una alta disponibilidad a los servicios ofrecidos por la red gracias al alto número de conexiones redundantes.

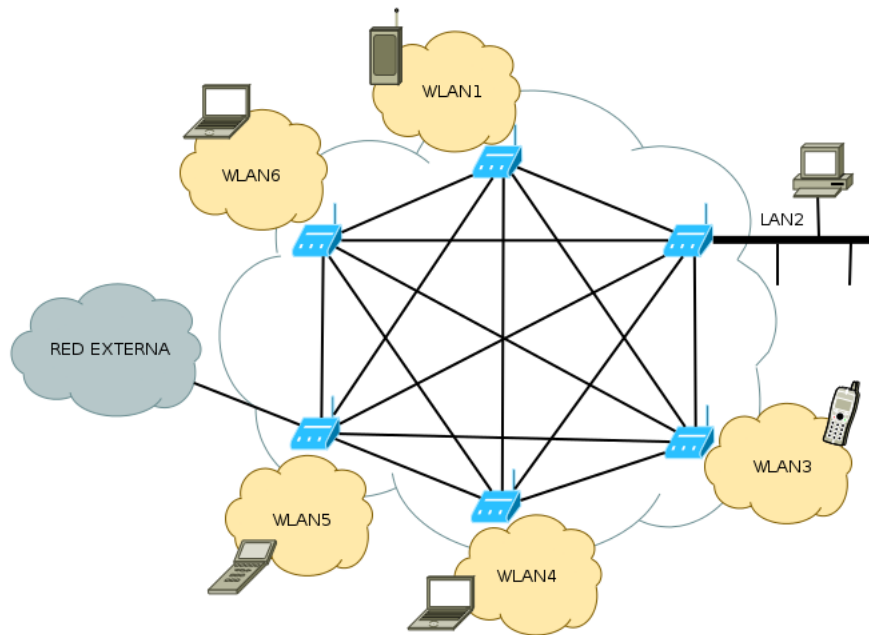


Figura 2.2: Ejemplo de red mesh

### 2.3.2. Problemática de las redes malladas

En las redes modo infraestructura, todos los clientes están conectados a un punto de acceso, el cual encamina los paquetes del cliente gracias a un protocolo definido y que generalmente no provoca pérdidas. Sin embargo, en las redes malladas el encaminamiento de paquetes se torna más complicado debido a que en general, los paquetes han de pasar por múltiples saltos inalámbricos para llegar a su destino y sus rutas pueden cambiar arbitrariamente. Esto hace que se introduzcan retardos adicionales, sobre todo en las redes con un gran número de nodos, debido que los protocolos introducen un mayor sobrecarga y procesamiento a los nodos en este tipo de redes.

Por otro lado, el *throughput* o velocidad de transmisión disponible también se ve afectado por estos múltiples saltos. Cuantos más saltos, más nodos activos existen en un mismo canal inalámbrico. Esto provocará mayores colisiones debido a que el espectro estará compartido por más nodos, y se traducirá en una reducción de velocidad de transmisión. En general, para  $N+1$  nodos compartiendo el mismo medio inalámbrico (misma área de cobertura), se observa una velocidad de transmisión determinada por:

$$\textit{Throughput} = \frac{\textit{ThroughputMax}}{N}$$

Donde *Throughput* es la velocidad de transmisión obtenida hacia un determinado destino, *ThroughputMax* es la velocidad máxima disponible en

un enlace de 1 salto en un determinado medio inalámbrico y  $N$  el número de saltos. Por ese motivo generalmente, en un mismo medio, mayores velocidades se obtendrán en enlaces con pocos saltos, mientras que la menor velocidad se obtendrá en una ruta en cascada por todos los nodos activos en la misma área de cobertura.

Adicionalmente, los protocolos de encaminamiento de las redes malladas introducen una sobrecarga en la red debido a la transmisión de paquetes de control hacia el medio. Por este motivo, la velocidad de transmisión se ve afectada. Esta reducción a causa de los mensajes de protocolo puede ser mínima en redes pequeñas, pero siempre será significativa en redes grandes con un elevado número de nodos.

### 2.3.3. Protocolos de encaminamiento

Los protocolos clásicos de encaminamiento no encajan bien en las redes malladas inalámbricas, debido a que pueden cambiar su topología dinámicamente, no existe una jerarquía o estructura y el medio inalámbrico es inherentemente poco fiable. Las redes malladas inalámbricas han de ser diseñadas y dimensionadas teniendo en cuenta unos determinados parámetros de servicio. La elección de un protocolo de encaminamiento u otro hace variar mucho los parámetros de servicio que una red puede ofrecer. Estos parámetros pueden resumirse en:

- **Fiabilidad:** La capacidad de una red de poder reconfigurarse rápidamente y soportar múltiples pasarelas, hace que los servicios ofrecidos por la red mallada apenas se vean afectados en caso de caídas de nodos u otras indisponibilidades. El protocolo de encaminamiento ha de ser capaz de reencaminar los paquetes de la manera más rápida y transparente posible.
- **Escalabilidad:** El número de nodos de una red está limitado a la sobrecarga que introduzca el protocolo de encaminamiento. Redes grandes con muchos nodos pueden resultar inmanejables. Es necesario encontrar un compromiso entre la información de usuario e información de control que circula por la red.
- **Calidad de Servicio:** Los nodos han de encaminar los paquetes por las "mejores rutas según una determinada métrica. Es necesario definir tipos de tráfico para dar una determinada calidad de servicio ( $QoS$ ) y ofrecer un mejor servicio final al usuario.
- **Transparencia:** El usuario debe poder conectarse a la red por medio de distintos puntos de acceso de forma transparente.

Generalmente, una menor sobrecarga de protocolo implica peor reacción ante fallos pero permite un gran número de nodos en la red, mientras que protocolos que sobrecargan mas la red con información de control poseen gran control de la topología y la reacción ante fallos es más rápida, pero a cambio, limita el numero de nodos de la red, y la hace menos escalable. Es por ello que la elección del protocolo de encaminamiento de la red mallada es un factor clave que determinará el rendimiento y funcionamiento de la misma.

El encaminamiento estático no es una opción viable para redes malladas con un gran número de nodos (imposibilidad de adaptarse, mala escalabilidad...). Por este motivo, los protocolos de encaminamiento para este tipo de redes son siempre dinámicos. En general éstos pueden ser clasificados, de acuerdo al momento en el cual actualizan sus tablas de encaminamiento, como protocolos proactivos y reactivos:

- Los protocolos proactivos son aquellos que buscan mantener permanentemente las tablas de encaminamiento actualizadas de tal manera que las solicitudes de transmisión de paquetes sean atendidas inmediatamente y exista un conocimiento total sobre el estado de la red. Para ello se requiere de la transmisión de paquetes, de forma periódica o como respuesta a algún evento, con información de actualización de rutas o estados. Ejemplos de este tipo de protocolos son RIP y OSPF.
- Los protocolos de encaminamiento reactivos son aquellos que incluyen nuevas rutas en las tablas de encaminamiento en el momento en el que se vayan a utilizar, por lo que se agrega un retardo significativo adicional cuando pretende encaminar un paquete cuya ruta no se conoce previamente. Estos protocolos envían información de control sólo en el proceso de descubrimiento de una nueva ruta, y al no requerir del intercambio permanente de paquetes sobre la red, son más adecuados en entornos en los cuales el ahorro de energía es vital, como por ejemplo las redes de sensores, que generalmente están alimentadas por baterías. Los protocolos más representativos de este tipo son AODV, DSR y ABR.

Comúnmente los protocolos de encaminamiento proactivos son más apropiados para redes malladas, ya que generalmente, sus nodos no tienen una gran limitación en lo que a recursos y energía se refiere. Los protocolos de encaminamiento de redes malladas inalámbricas utilizan generalmente una métrica para calcular cual es la mejor ruta para alcanzar un destino. Este parámetro se obtiene de forma directa a través de mediciones o a través del cálculo de una combinación ponderada de varios parámetros, y sirve al nodo para encaminar el paquete por uno u otro enlace.



Las métricas usadas por los protocolos suelen estar basadas en el número de saltos, el retardo, la estabilidad del enlace, el ancho de banda del enlace, las pérdidas de paquetes de un enlace e incluso en el coste económico de un enlace. Algunas de las métricas más usadas en protocolos de encaminamiento de redes malladas son *Hop Count* (basada en el número de saltos, considerando como salto a un enlace inalámbrico) u otras métricas relacionadas con la calidad del enlace como ETX (Expected Transmission Count), ETT (Expected Transmission Time), WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time), etc. La elección de la métrica o la definición de su cálculo es un aspecto muy importante que debe considerar las condiciones del entorno en el cual la red se instalará. ETX es una de las métricas más extendidas y fue probablemente la primera métrica diseñada para redes malladas inalámbricas. Dicha métrica está basada en el número de intentos de retransmisión necesarios para enviar un paquete por un enlace de manera exitosa. El valor de ETX varía desde 1 (máxima calidad en el enlace) a infinito (enlace caído).

También podemos clasificar los protocolos de encaminamiento según en el nivel del modelo OSI (Open System Interconnection) en el que trabajen:

- **Nivel 3:** Desde la creación del modelo OSI, se estableció que el nivel 3 o capa de red sería la encargada del direccionamiento lógico y encaminamiento de los paquetes entre una o más redes. El nivel 3 implementa los mecanismos que hacen posible transmitir secuencias de datos de longitud variable desde un origen a un destino a través rutas establecidas en los nodos. El protocolo IP (Internet Protocol) es la implementación más extendida del nivel de red. Gracias a su mecanismo de direcciones y máscaras, dota a la red de una gran escalabilidad, permitiendo segmentar jerárquicamente las redes en subredes y posibilitando un encaminamiento ordenado. El protocolo IP sin embargo no ofrece generalmente garantías de QoS, sino que ofrece al usuario el mejor servicio posible según el estado de la red en un determinado momento.
- **Nivel 2:** El nivel 2 o capa de enlace fue diseñada en un origen para permitir el direccionamiento físico, de la gestión del acceso al medio en diferentes topologías, de la detección de errores en los enlaces, del control del flujo y de la distribución ordenada de los paquetes. Sin embargo, actualmente se han añadido funcionalidades de encaminamiento en este nivel en algunos protocolos, dotando a este tipo de redes de algunas características especiales. El nivel 2 es transparente para las capas superiores, por lo que los protocolos de encaminamiento que trabajen en la capa de enlace lo serán también para la capa de red. Esto simplifica la comunicación con nivel IP, donde cualquier topología se convierte en un solo *hub* o segmento LAN 802.x

ya sea por cable o inalámbrico. Esta transparencia u ocultación de la red física, se ofrece tanto para tramas *unicast*, *multicast* y *broadcast* [7] de dentro y fuera de la red mallada. El hecho de que un protocolo de encaminamiento trabaje en la capa de enlace, hace que el acceso a la información de la capa física y capa MAC (Media Access Control) sea más rápido y completo, mejorando la eficiencia de las decisiones de encaminamiento y reduciendo el tiempo de reacción ante posibles fallos en la red. Además, esto añade la ventaja de ser independiente a esquemas de direccionamientos concretos de nivel 3, por lo que no existirán problemas de incompatibilidad con IPv4 o IPv6. También permite a nodos con pocos recursos formar parte de la red sin necesidad de implementar todo el nivel IP. Sin embargo, una red cuyo protocolo de encaminamiento trabaje a nivel 2 resulta poco escalable, debido a la falta de jerarquía en el direccionamiento MAC, por lo que generalmente este tipo de redes suelen ser de tamaño pequeño o medio.

A continuación vamos a analizar 3 protocolos de redes malladas inalámbricas que consideramos los más representativos en la actualidad.

### A) OLSR

OLSR (Optimized Link State Routing)[8] es un protocolo de encaminamiento proactivo de nivel 3 OSI diseñado para redes *ad-hoc*. Se trata de un protocolo basado en los protocolos de estado de enlace o *link-state* como OSPF o IS-IS, de los cuales hereda su estabilidad y control sobre la red, pero optimizado para redes *ad-hoc*, cuyo ancho de banda es limitado y cuyos nodos pueden poseer una alta movilidad, haciendo un uso más eficiente de los recursos y evitando posibles bucles derivados de la movilidad. Esta optimización viene dada por un cambio en la métricas usada, ETX, y de un nuevo mecanismo eficiente de propagación de información parcial del estado de la red, empleando un conjunto de nodos especiales llamados Multipoint Relays(MPR). En la Figura 2.3 podemos ver un ejemplo de cómo funciona esta optimización.

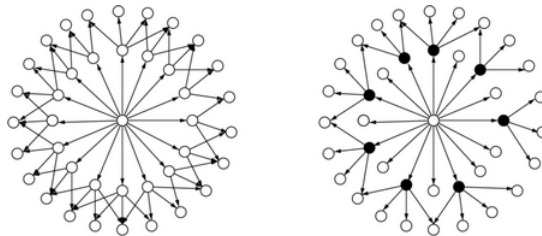


Figura 2.3: Comparación de inundación tradicional e inundación optimizada usando MPR. La fuente del mensaje es el nodo en el centro y cada flecha hacia otro nodo indica que un nodo recibe la copia del mensaje. Los nodos negros son seleccionados por el nodo central como MPR. [9]

Los MPR intercambian información periódicamente sobre los enlaces con sus nodos vecinos mediante el envío de mensajes Topology Control(TC). Cada nodo además, envía de forma periódica mensajes Hello y MID a sus nodos vecinos (mensajes que sólo se propagan 1 salto) para comprobar el estado de los enlaces entre ellos. Esta técnica permite reducir la sobrecarga de paquetes en comparación con un mecanismo puro de inundación, reduciendo la información parcial del estado del enlace transmitida en la red, y por lo tanto, consumiendo menos recursos y mejorando la eficiencia de la red.

OLSR es un protocolo adecuado para redes densas con un gran número de nodos y es en las que las optimizaciones ideadas ofrecen una mayor eficiencia respecto a los protocolos de estado del enlace clásicos como OSPF. Opera en modo distribuido, por lo que no depende de una entidad central. Además, no requiere de una transmisión fiable de sus mensajes de control, ya que es tolerante a pérdidas esporádicas de paquetes de control y tampoco lleva asociado un mal comportamiento debido al reordenamiento de paquetes, que habitualmente existe en las redes malladas.

Con OLSR, los nodos conocen la mejor manera de encaminar los paquetes ya que conocen completamente la topología de la red y tiene en cuenta la calidad de los enlaces, pero se añade el inconveniente de crear una carga de tráfico en la red y una carga de procesamiento extra en los nodos al crear las tablas de encaminamiento con el algoritmo de Dijkstra u *open path first* [10].

Esto lo convierte en protocolo pesado y no apto para dispositivos con pocos recursos. Sin embargo, es la mejor opción para redes *ad-hoc* con una gran densidad y un gran número de nodos. Se ha comprobado que el funcionamiento de OLSR es aceptable en redes compuestas por unos 1000 nodos [11]. Actualmente la implementación más usada es *olsrd*<sup>1</sup>, pero existen otras como *nrl-olsr*<sup>2</sup> creada por el Naval Research Laboratory de EEUU y *inria-olsr*<sup>3</sup>, creada por el instituto francés INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique)

## B) Batman-adv

B.A.T.M.A.N Advanced(*Batman-adv*) es una implementación de nivel 2 OSI del protocolo de encaminamiento B.A.T.M.A.N(Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking)[12]. B.A.T.M.A.N es un protocolo de enrutamiento para redes mesh/*ad-hoc* inalámbricas multisalto y fue diseñado a causa de algunas de las deficiencias del protocolo OLSR, como el alto consumo de recursos.

---

<sup>1</sup><http://www.olsr.org/>

<sup>2</sup><http://cs.itd.nrl.navy.mil/work/olsr/index.php>

<sup>3</sup><http://hipercom.inria.fr/olsr/>

En B.A.T.M.A.N, ningún nodo tiene la información completa de la topología de la red ya que no es necesario. Para construir su tabla de encaminamiento, cada nodo percibe y mantiene solo la información sobre el mejor "siguiente salto" hacia el resto de los nodos de la red. Para construir las tablas de encaminamiento, cada nodo transmite mensajes en *broadcast* llamados *Originator Messages* (OGM) para informar a los nodos vecinos sobre su existencia. Estos vecinos redifusionan los OGM según algunas reglas específicas para informar a sus vecinos sobre la existencia del nodo que originalmente envió el paquete. De esta manera, la red es inundada de forma selectiva con los mensajes OGM. Los OGM son paquetes de 52 bytes y contienen la dirección del nodo que originalmente envió el paquete, la dirección del último nodo que transmitió el paquete, TTL (Time-to-live) y un número de secuencia. De esta manera, todos los nodos de la red tendrán constancia de la existencia del resto de nodos, pero no tendrán información topológica acerca de la ruta hacia ellos.

Para saber cual es el mejor enlace hacia un nodo, se hace uso de una ventana deslizante para almacenar los números de secuencia recibidos de cada destino. El número de secuencia permite diferenciar información nueva y obsoleta. La ventana deslizante tiene un tamaño máximo y la cantidad de números de secuencia (paquetes recibidos no repetidos) en la ventana se usa como métrica para determinar la calidad de las rutas hacia el resto de nodos de la red. Esta métrica recibe el nombre de TQ (transmission Quality). La elección de rutas viene ejemplificado en la Figura 2.4.

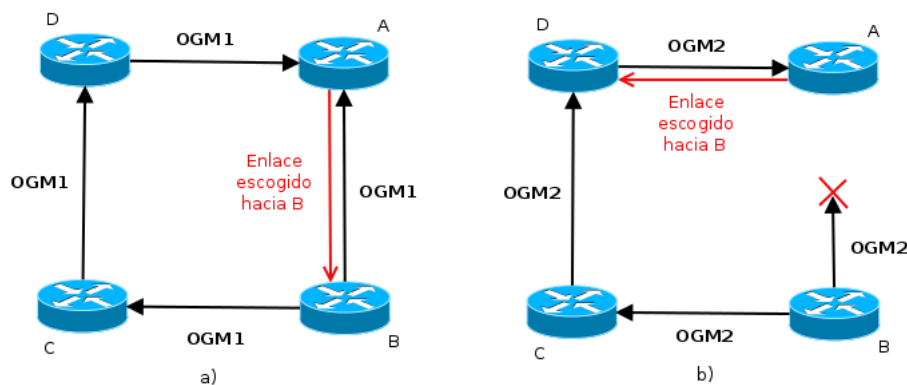


Figura 2.4: Ejemplo de selección de rutas de B.A.T.M.A.N. El nodo B, envía continuamente sus mensajes OGM. El nodo A, recibe los OGM de B y procede a calcular la ruta óptima hacia B. En el caso a), A escoge el enlace A-B como mejor camino hacia B, ya que por este enlace el OGM de B ha llegado más rápido (enlace con mayor calidad). En el caso b), cambia su decisión y escoge el enlace A-D como mejor camino hacia B, ya que ahora ha recibido 2 OGM de B por el enlace A-D, mientras que sólo ha recibido un OGM de B por el enlace A-B.

Las primeras implementaciones de B.A.T.M.A.N operan en la capa 3 del modelo OSI(*batmand*), lo que implica que todos los paquetes van sobre UDP (User Datagram Protocol), obligando al nodo a manipular la tabla de rutas del *kernel* (el núcleo del sistema operativo del nodo). Sin embargo, *Batman-adv* al trabajar completamente en el nivel 2 del modelo OSI, tanto la información de usuario como el tráfico de control es transportado en tramas ethernet mediante encapsulamiento hasta el nodo destino, emulando un *switch virtual* entre todos los nodos de la red. Esto hace que todos los nodos parezcan estar conectados con un enlace local de 1 salto desde el punto de vista de IP, ocultándoles la verdadera topología de la red así como de los cambios en la misma. La implementación en el nivel 2, y hace que exista un encaminamiento del flujo de datos más eficiente y una mayor simplicidad a la hora de dar servicios de *roaming*(servicio de itinerancia) a los equipos clientes.

Las últimas revisiones del protocolo B.A.T.M.A.N ha introducido un nuevo paquete llamado ELP(Echo Location Protocol). Los mensajes ELP son paquetes que se envían con alta periodicidad para comprobar rápidamente el estado de los enlaces locales, de manera que no se propagan por toda la red. Los mensajes OGM siguen cumpliendo la misma tarea que tenían asignados en anteriores versiones. Con esta división de tareas entre ELP y OGM podemos reducir ampliamente el intervalo de envío de los OGM( reduciendo el ancho de banda usado y la capacidad de procesamiento), mejorando los tiempos de convergencia y simplificando notablemente el núcleo del protocolo de encaminamiento de B.A.T.M.A.N.

*Batman-adv* es la implementación más usada actualmente y *batmand* cada vez tiene menos uso. Sin embargo, existen muchas versiones de *Batman-adv* debido a su constante evolución y a su activa comunidad de desarrollo. Ambas implementaciones fueron desarrolladas por la comunidad Open-Mesh<sup>4</sup>

### C)IEEE 802.11s

El estándar IEEE 802.11s[13] es el estándar de comunicaciones *ad-hoc* para redes inalámbricas 802.11. IEEE 802.11s es una solución basada en el nivel 2 OSI que provee de capacidades de encaminamiento a las redes malladas inalámbricas. El protocolo por defecto que usa 802.11s es HWMP(Hybrid Wireless Mesh Protocol). Combina la flexibilidad del descubrimiento de ruta bajo demanda con la eficiencia de un encaminamiento proactivo. La combinación de ambos hace que 802.11s sea adecuado para una gran variedad de dispositivos y redes. La implementación de HWMP es obligatoria, sin embargo el *framework* o marco de trabajo permite usar otros protocolos de encaminamiento.

---

<sup>4</sup><http://www.open-mesh.org/>

En las redes 802.11s Se han definido nomenclaturas para 4 tipos de nodos, las cuales podemos apreciar en la Figura 2.5:

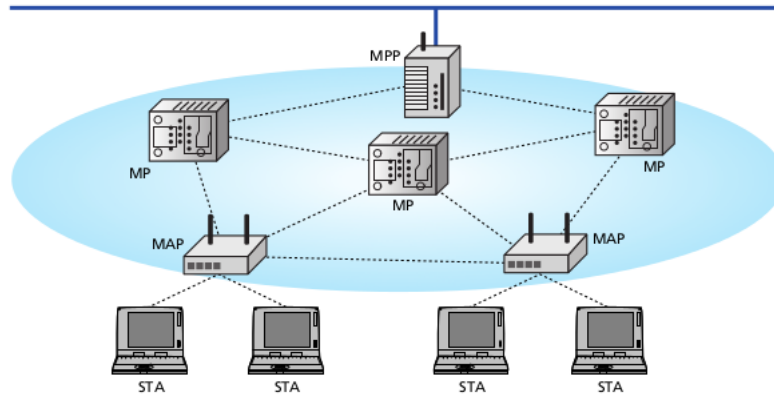


Figura 2.5: Ejemplo de red malla inalámbrica bajo la nomenclatura de 802.11s[14]

- Station(STA). Equipos externos a la red mesh conectados a ella mediante un punto de acceso que no implementan 802.11s
- Mesh Point(MP). Establece enlaces con otros vecinos MP. Participan en la red como nodos de comunicación y extienden la cobertura.
- Mesh Access Point(MAP). Funcionalidad de MP, pero que proporciona un punto de acceso, mediante wifi o ethernet para que las STA puedan conectarse a la red mesh.
- Mesh Portal Point (MPP). Nodo de la red que actúa de pasarela entre la red mesh y otra red exterior

Al igual que sucede con otros protocolos que encaminan a nivel 2, la red se comporta como un solo segmento LAN 802.x (*Ethernet o Wireless*) de cara a otras redes y a protocolos de niveles superiores. Sin embargo, además de poseer las características de cualquier protocolo de encaminamiento de nivel 2, 802.11s define de una manera más precisa el acceso al medio, la sincronización y seguridad.

El protocolo HWMP contempla 2 modos de funcionamiento: basado en RM-AODV (por demanda) y basado en árbol de encaminamiento(*modo root*). Para ambos modos de funcionamiento se definen los siguientes tipos de paquetes:

- Root Announcement (RANN). Da información a los nodos sobre la presencia y distancia de un nodo raíz

- Path Request (PREQ). Pregunta a otros MP la ruta hacia un determinado originador
- Path Rply (PREP). Envía la ruta solicitada hacia un originador. Puede ser enviado por el nodo destino o por cualquier otro nodo que conozca la ruta.
- Path Error (PERR). Se informa que un originador no puede ser alcanzado por una cierta ruta.

En el modo de funcionamiento por demanda, reflejado en la Figura 2.6 un nodo MS *A* que quiere conectarse con otro MS *B*, envía en *broadcast* un mensaje PREQ. Todos los MS intermedios que reciban el paquete crearán o actualizarán su ruta hacia *A* siempre que el número de secuencia del paquete DSN sea mayor que el último que recibieron y la métrica sea mayor. Cada MS, antes de retransmitir, de nuevo *broadcast*, el mensaje PREQ, debe actualizar el campo correspondiente a la métrica para reflejar la métrica acumulada hacia *B*. Una vez que *B* reciba el PREQ mandará hacia *A* un mensaje PREP en *unicast*. En el caso de que *B* reciba más de un PREQ con mejor métrica y un número de secuencia superior al último, mandará un nuevo PREP hacia la ruta actualizada. Cuando el mensaje PREP llega a *A* la ruta queda establecida. Si *A* recibe más de un PREP, sólo los tendrá en cuenta si la métrica es mejor y el número de secuencia es correcto.

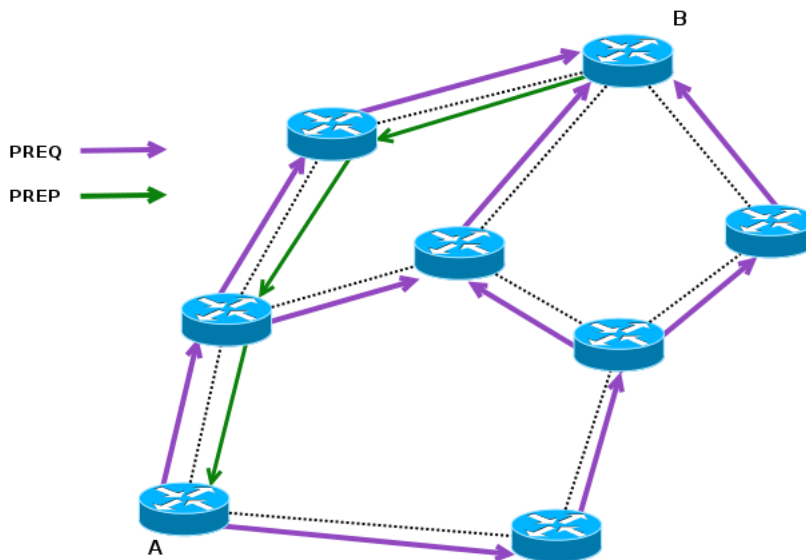


Figura 2.6: Ejemplo de encaminamiento 802.11s modo bajo demanda

Este modo de funcionamiento posee las características de AODV<sup>5</sup>, añadiendo funcionalidades de descubrimientos de destinos bajo demanda. Esto simplifica la integración con nodos móviles y evita que los nodos mantengan rutas hacia destinos que ya no están activos o alcanzables. Para limitar la inundación de mensajes por toda la red se usa el mecanismo *Expanding Ring Search*, esto es, realizar una inundación secuencial incrementando el TTL sucesivamente, de modo que se prioricen los destinos más cercanos frente a los más lejanos.

El modo de funcionamiento basado en árbol de encaminamiento está reflejado en la Figura 2.7. Se puede designar un nodo raíz (*root*) que construye y mantiene un árbol de encaminamiento. Cada MP posee uno o varios nodos raíz los cuales hacen de intermediarios para establecer las rutas. Cuando un MP *A* quiere conectarse con otro MP *B*, *A* debe mandar un PREQ a su nodo *root*, el cual conoce la ruta hacia el destino *B*. Posteriormente, *B* transmite PREP hacia *A*, usando la ruta que pasa por el nodo *root*. Opcionalmente, *B* puede emitir un PREQ hacia *A* para establecer una ruta más eficiente si lo considera oportuno.

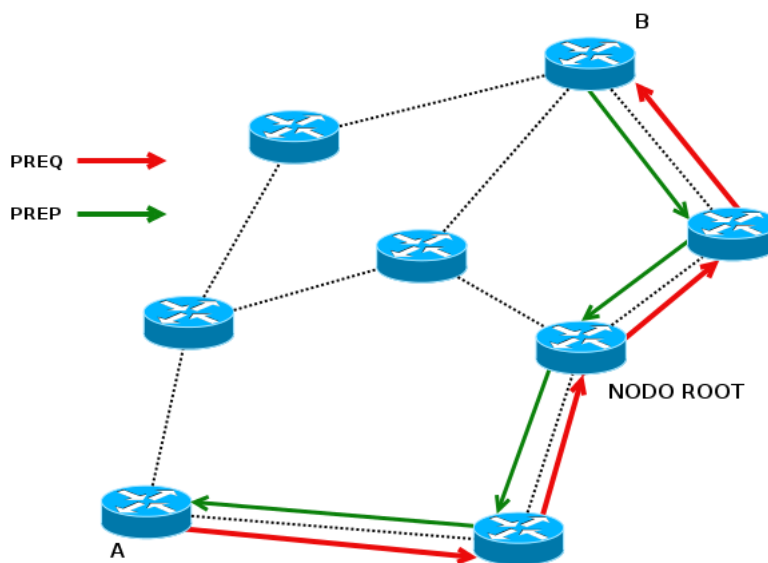


Figura 2.7: Ejemplo de encaminamiento 802.11s modo root

Este modo de funcionamiento evita inundar toda la red con mensajes de descubrimiento. El nodo raíz construye su árbol de encaminamiento a partir de mensajes Route Request que emite para conocer las rutas hacia los destinos y mensajes Root Announcements para informar de su presencia a los demás nodos. En el caso de que haya varios nodos raíz los MP seleccionan su nodo raíz basándose en el camino con menor métrica.

<sup>5</sup>RFC 3561



La métrica usada por defecto en 802.11s se llama *Airtime Link Metric*, aunque también se da soporte a otras métricas que consideren la QoS, balanceo de carga, el consumo, etc. . . *Airtime Link Metric* esta diseñada para estimar la cantidad de recursos del canal consumidos cuando las tramas son transmitidas, tomando como parámetros la tasa de pérdidas de paquetes y el ancho de banda del enlace inalámbrico. Otras métricas como ETT también tienen en cuenta estos parámetros, sin embargo, *Airtime Link Metric* también tiene en cuenta la sobrecarga del canal de acceso y de protocolo. La métrica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$c_a = \left[ O_l + O_p + \frac{B_t}{r} \right] \cdot \frac{1}{1 - \epsilon}$$

Donde  $c_a$  es el coste total,  $O_l$  es la constante que cuantifica la sobrecarga del canal de acceso del enlace,  $O_p$  es una constante que cuantifica la sobrecarga del protocolo de nivel de enlace. La tasa de transmisión  $r$  es la tasa en Mbps con la que se envía una trama de prueba de longitud  $B_t$  en bits<sup>6</sup> con una tasa de pérdida de tramas  $\epsilon$ , que varía según las condiciones existentes en el medio inalámbrico. La tasa de transmisión depende del nivel de modulación MCS usado.

La métrica se calcula al final del establecimiento de cada enlace. Para ello se hace uso del campo Frame Error Rate(FER) que va incluido en la trama de prueba y el paquete Link Metric Report(LMR) que informa sobre el valor del coste del enlace. Una vez el enlace está establecido, se monitoriza el coste del enlace con una cierta periodicidad.

Actualmente la implementación de 802.11s más usada es *open80211s*<sup>7</sup>. Se trata de una implementación para el núcleo de Linux que viene incluida a partir de la versión 2.6.26. Fue desarrollada por un consorcio empresarial formado por Nortel, Cozybit, OLPC(One Laptop per Child) y Google. También existe una implementación para FreeBSD, *WifiMesh* la cual viene incluida a partir de la versión 8.0, pero no es compatible con la implementación *open802.11s* debido a que están basadas en versiones distintas de 802.11s.

<sup>6</sup>Generalmente el valor de la longitud de la trama es 8192 bits

<sup>7</sup><http://open80211s.org/>

### 2.3.4. Comparación preliminar de protocolos

Como hemos mencionado anteriormente, el rendimiento de una red mallada inalámbrica depende mucho del protocolo de encaminamiento que esté implementado en ella. Una vez analizados los protocolos más importantes para redes malladas inalámbricas, los compararemos de forma genérica antes de realizar nuestro estudio centrado en el contexto de telecomunicaciones rurales.

La primera y más notable diferencia de los protocolos mencionados es el nivel del modelo OSI en el que trabajan. OLSR trabaja a nivel IP, mientras que Batman-adv y 802.11s trabajan en el nivel de enlace. Esto arroja una importante conclusión. Debido a la limitación del direccionamiento físico frente al lógico, las redes donde Batman-adv o 802.11s estén implementados serán de pequeño o medio tamaño, mientras que las que tengan OLSR podrán ser muy grandes. Este hecho está relacionado con que para direccionar y encaminar en redes grandes, es necesario una lógica compleja. Por lo tanto, es comprensible que OLSR sea un protocolo más complejo y pesado que Batman-adv y 802.11s. Un protocolo que consuma muchos recursos de red como OLSR, sólo podrá trabajar sobre redes cuyos nodos sean suficientemente potentes. Esto convierte a Batman-adv y 802.11s en protocolos adecuados para redes malladas inalámbricas donde los nodos tengan escasos recursos. En lo que a consumo se refiere, 802.11s es más eficiente que Batman-adv debido a que tiene un modo de funcionamiento basado en encaminamiento reactivo o por demanda, lo que lo hace mucho más liviano y lo hace idóneo para redes malladas inalámbricas formadas por redes de sensores. En este aspecto, Batman-adv es menos eficiente debido a estar basado completamente en un encaminamiento proactivo.

Si comparamos el funcionamiento entre Batman-adv y 802.11s podemos comprobar que existen también importantes diferencias. Por un lado Batman-adv generalmente posee la capacidad de encaminar por rutas más estables y ofrece una mayor eficiencia en el uso del ancho de banda, sin embargo, hay una peor respuesta a cambios en la topología de la red, ya que depende mucho del intervalo de envío de paquetes OGM. Por otro lado, 802.11s posee rutas más inestables, debido a que su métrica varía de forma más rápida e incluso pudiendo provocar en ocasiones situaciones de *flapping* (conmutación rápida entre varias rutas). Pero también hace que el rendimiento de la red se vea prácticamente inalterado ante cambios de topología[15].

También es interesante mencionar, que 802.11s tiene la ventaja de estar muy ligado al nivel físico, lo que le permite aprovechar de manera más eficiente los recursos físicos del medio que Batman-adv. Sin embargo, esto puede ser considerado también una desventaja ya que 802.11s está limitado a trabajar con tecnologías del tipo 802.11, mientras que Batman-adv puede trabajar con múltiples tecnologías independientemente del nivel físico.

De forma general, podemos concluir que 802.11s es la mejor opción para redes de tamaño pequeño o medio cuyos nodos poseen una cierta movilidad o cuya topología es susceptible a usuales cambios, mientras que Batman-adv es la mejor opción para manejar redes de tamaño pequeño o medio cuyos nodos son en su mayoría estáticos o topología es relativamente estable. Si tenemos que abordar redes grandes, la mejor opción será OLSR, el cual dará una gran estabilidad y control sobre la red.

A modo de aclaración, se adjunta la Figura 2.8, una comparativa de las principales características de los protocolos anteriormente descritos:

	OLSR	Batman-adv	802.11s
Nivel OSI	IP - 3	Enlace - 2	Enlace - 2
Métrica	ETX	TQ	AirTime
Modo de encaminamiento	Proactivo	Proactivo	Proactivo/Reactivo
Tipo de red	Grande Movilidad limitada	Media/Pequeña Movilidad limitada	Media/Pequeña Gran movilidad
Consumo de recursos	Alto	Bajo	Muy Bajo

Figura 2.8: *Matriz comparativa de protocolos*

## 2.4. Aplicación de redes malladas en zonas rurales

Una vez que tenemos una visión general sobre las redes malladas inalámbricas, es posible estudiar el impacto y viabilidad de su implantación en zonas rurales. Como ya hemos comentado, existe cierta problemática para llevar las TIC al mundo rural. Es por ello que este proyecto estudia la conveniencia de la implantación de redes malladas inalámbricas en entornos rurales e intentar solventar las carencias que las tecnologías comunes no pueden cubrir.

Es el alto coste de inversión necesario lo que hace que a las grandes compañías de telecomunicaciones no les resulte rentable llevar conectividad a las zonas rurales. Dichas zonas representan un gran cantidad de posibles clientes, pero el alto coste en infraestructuras hace que cualquier proyecto sea inviable sin una ayuda directa del gobierno del país. En los países más desarrollados, el propio estado se encargaba de desplegar una red que cubría más del 90% del territorio, para posteriormente forzar un proceso de privatización de dichas redes. Sin embargo generalmente en los países del sur, como por ejemplo Perú, el gobierno no está directamente implicado en desplegar una red estatal de telecomunicaciones para todo el país, si no que son las grandes empresas de telecomunicaciones las encargadas de llevar las comunicaciones a todo el país. Debido a cuestiones de rentabilidad, se genera una situación donde las zonas rurales quedan olvidadas en lo que se refiere al acceso a las TIC, salvo por proyectos puntuales del gobierno u organizaciones no gubernamentales.

Y es en este "vacío", donde las redes malladas inalámbricas pueden generar un mayor beneficio. La principal ventaja de la aplicación de redes malladas inalámbricas es su bajo coste en comparación con las tecnologías habituales. Esto es debido a que con un número no muy grande de nodos se puede dar cobertura a grandes áreas. Estos nodos, que pueden llegar a costar menos de 90\$, pueden adquirirse fácilmente y colocarse allí donde sea necesario. Pero además del coste, una arquitectura *ad-hoc* tiene la ventaja de hacer un uso más eficiente del espectro, debido a que se satura menos ya que los nodos no necesitan transmitir con gran potencia.

El hecho de que las redes malladas sean redes distribuidas, las hace mucho más estables y fiables que las redes en modo infraestructura. Esto es debido a que si en una red mallada inalámbrica se dan cambios de topología debido a caída de enlaces o nodos, por ejemplo debido a una catástrofe o a la falta de mantenimiento, los servicios de la red no se ven gravemente afectados debido a su capacidad de re-encaminar el tráfico por otros caminos alternativos.

Son independientes de nodos centrales o pasarelas y aunque requieren una considerable cantidad de enlaces redundantes, no supone un gran problema debido al hecho de que la creación de nodos conlleva un coste relativamente bajo. Esto hace que sean redes robustas, capaces de dar servicio cuando diversos nodos fallen debido a inclemencias del tiempo o incluso en catástrofes naturales. Es por este motivo que las redes malladas son ampliamente usadas en proyectos militares y protocolos de emergencia.

Por último, cabe destacar que la creación de redes malladas inalámbricas implica que al no existir la necesidad de centralizar el tráfico a ciertos nodos importantes, se están desplegando redes locales que permiten a sus usuarios comunicarse entre sí sin la necesidad de una monitorización, control y supervisión externa, como puede ser una empresa de telecomunicaciones o el gobierno. Implícitamente, esto equivale a que las redes desplegadas serán más independientes, libres y menos propensas a posibles censuras externas.

### **2.4.1. Ejemplo de aplicación de redes malladas: Redes Libres Comunitarias**

La primera red mallada inalámbrica, ALOHAnet, nació en los años 70 junto con las primeras redes de ordenadores como ARPANET, PRNET y SATNET. Pero no ha sido hasta la aparición de las redes MANET en los años 90 y la implantación de las tecnologías 802.11 en la primera década del siglo XXI, cuando las redes malladas inalámbricas se han abierto al gran público.

El uso masivo de las redes malladas inalámbricas comenzó con el nacimiento de las Redes Libres Comunitarias. Éstas son un tipo de redes nacidas con el objetivo de que el usuario pueda acceder libremente a la información y comunicarse sin restricciones. Se basan en los principios de libertad de acceso, gestión comunitaria y neutralidad de la red. Las redes libres comunitarias buscan ofrecer una red alternativa que sea independiente a gobiernos y grandes empresas. En diversos países intentan ser además una herramienta que luche contra la brecha digital de forma más eficiente. Generalmente las redes libres comunitarias se despliegan en base a un *firmware* (software fuertemente ligado al hardware del equipo) propio de libre distribución, desarrollado en la mayoría de los casos a partir de distribuciones basadas en GNU/Linux, con algunas modificaciones en las interfaces de usuario y las configuraciones. Algunas de las redes comunitarias más importantes son:

- **Freifunk**<sup>8</sup> (en alemán: Radio Libre<sup>7</sup>) es una de las redes comunitarias más antiguas y con mayor experiencia en el mundo. Se trata de una red comunitaria sin ánimo de lucro que da soporte a redes inalámbricas libres principalmente en regiones de Alemania. Gran parte de sus infraestructuras se basan en una arquitectura mallada. Freifunk es parte de un movimiento internacional para redes inalámbricas abiertas, que actualmente cuenta con un amplio apoyo en muchos países, incluidos los países pobres. Actualmente, la mayoría de los nodos trabajan con OLSR, aunque se está produciendo una considerable migración al protocolo B.A.T.M.A.N. Se puede considerar a Freifunk como la precursora de las redes comunitarias libres.
- **Guifi.net**<sup>9</sup> es una red de telecomunicaciones desarrollada en España, abierta, libre y neutral que se vertebra a partir de un acuerdo de interconexión en el que cada participante, al conectarse, extiende la red y obtiene conectividad. Los usuarios de Guifi.net son particulares, empresas y administraciones que construyen una red de telecomunicaciones ciudadana. Se trata de la red libre comunitaria más grande del mundo, con más 19000 nodos operativos en la actualidad. Sin embargo, la implementación mallada sólo está extendida en ciertas partes de la red. Dichas implementaciones trabajan con OLSR y B.A.T.M.A.N.
- **Bogota-mesh**<sup>10</sup> es la red comunitaria libre del proyecto Bogotá libre. Surgió con el objetivo de servir como plataforma para ayudar a disminuir la brecha digital en Bogotá y ayudar a la creación de una red independiente donde los proyectos personales, educativos, culturales y sociales tengan acogida y difusión. Es una red que en su mayor parte está implementada con arquitectura *ad-hoc*. El número de nodos es de varias decenas y el protocolo usado es B.A.T.M.A.N. Bogota-mesh está actualmente trabajando con un gran número de proyectos de redes comunitarias en latinoamérica que comparten los mismos objetivos, como Valledupar-mesh, Medellín-libre, Lurgo-mesh, Red Fusa Libre, Caribe Mesh, Quintana Libre, etc ...
- **Village Telco**<sup>11</sup> es una iniciativa para construir una red comunitaria libre inalámbrica totalmente mallada de bajo coste que dé servicio telefónico y opcionalmente de acceso a Internet en áreas rurales o aisladas. Se basa en un conjunto de software y hardware específico con el que se puede configurar de forma fácil y rápida una red comunitaria mallada en cualquier parte del mundo con unos requisitos mínimos de

---

<sup>8</sup><http://start.freifunk.net/>

<sup>9</sup><http://guifi.net/>

<sup>10</sup><http://www.bogota-mesh.org/>

<sup>11</sup><http://villagetelco.org/>

energía. Los equipos usados son los Mesh Potato, dispositivos plug-and-play basados en una antena con capacidad de encaminamiento y conexiones de VoIP(ATA), donde se instala una versión de OpenWrt que trabaja con el protocolo Batman-adv y algunos módulos de telefonía IP como Asterix. Village Telco surgió debido a la necesidad de millones de personas de tener un acceso a las comunicaciones, principalmente llamadas telefónicas locales y acceso a Internet de forma barata en lugares poco accesibles o aislados. Muchas de estas personas gastaban gran parte de su salario(a veces hasta el 40 %) en el uso de teléfonos móviles que usan las redes de la teleoperadoras estatales, las cuales ofrecen servicios mucho más costosos para la población. Con el proyecto se intenta rebajar el coste del uso de las redes a una pequeña fracción de lo que gastan actualmente gracias al uso de su propia infraestructura. El proyecto fue ideado y desarrollado por la comunidad Freifunk, y es una entidad independiente, sin ánimo de lucro, aunque genera los suficientes beneficios para hacer el proyecto viable y sostenible en el tiempo.

## 2.5. Conclusiones

En este capítulo hemos tratado la necesidad de llevar las TIC a las zonas rurales de la forma más eficiente posible. Por eso en este proyecto se propone el uso de las redes malladas inalámbricas para abordar este problema. Las redes malladas inalámbricas pueden ser una potente herramienta para luchar contra la brecha digital de forma más barata, eficiente y sostenible. Precisamente, estas tecnologías se encuentran en la actualidad en un constante crecimiento, y existe un gran número de proyectos que continuamente están desarrollando nuevas tecnologías para su mejor implantación en la sociedad, lo que convierte a las redes malladas inalámbricas en un importante objeto de estudio.





# Capítulo 3

## IMPLEMENTACIÓN

### 3.1. Introducción

En el capítulo anterior hemos visto que existen numerosas posibilidades para implementar una red mallada inalámbrica, ya que dependen mucho de la tecnología aplicada. Dependiendo de las necesidades de cada tipo de red existe una implementación óptima para cada una. Como hemos comentado anteriormente, uno de los aspectos más determinantes en la eficiencia de una red es su protocolo de encaminamiento. Por este motivo, se va a realizar un estudio sobre qué protocolo de encaminamiento es más eficiente para el caso de redes malladas inalámbricas en entornos rurales. Para realizar nuestro estudio, hemos de caracterizar una red mallada inalámbrica rural como una red cuyos enlaces poseen baja calidad y bajo ancho de banda, y cuya topología puede tener cambios con relativa frecuencia.

Para este proyecto se ha establecido que se estudiará el funcionamiento de los protocolos Batman-adv y 802.11s en redes malladas inalámbricas ubicadas en entornos rurales. Se ha enfocado su estudio en estos dos protocolos por varios motivos:

- Las redes malladas inalámbricas ubicadas en zonas rurales serán generalmente de tamaño pequeño o medio y sus nodos serán relativamente modestos para reducir el coste total de la red. Por lo tanto protocolos Batman-adv y 802.11s, aparentemente, han de ser los más adecuados para este tipo de redes, debido a sus bajos requisitos de hardware y su buen funcionamiento en redes no muy grandes.
- Los dos protocolos Batman-adv y 802.11s trabajan en el nivel 2 OSI, por lo que será una comparación más adecuada que comparar protocolos de distintos niveles en de la arquitectura OSI.

- El trabajar en el nivel 2 OSI, hace que Batman-adv y 802.11s tengan importantes ventajas respecto a los protocolos de encaminamiento que trabajan en el nivel de red. Algunas de éstas son una total transparencia hacia el nivel IP, una mejor comunicación con el nivel físico y una mayor eficiencia al prescindir de cabeceras de niveles superiores.
- En la actualidad, la mayor parte de las investigaciones y desarrollos se están realizando en estos dos protocolos debido al gran soporte que ofrecen sus comunidades de usuarios.

Por este motivo, nos centraremos en estos dos protocolos para analizar su funcionamiento en nuestro contexto. Aunque nuestro proyecto se focaliza en los protocolos 802.11s y Batman-adv, cabe destacar que se han dedicado tiempo y recursos para estudiar, implementar y analizar redes malladas con OLSR con el fin de ofrecer cursos de capacitación sobre redes malladas en entornos rurales. La ventaja de OLSR es que está implementado en multitud de *firmwares* para equipos inalámbricos. Una de ellas es Commotion Wireless, que tiene una interfaz muy intuitiva y hace que la instalación de una red mallada inalámbrica se convierta en algo realmente sencillo. Esto es de suma utilidad cuando se quiere transferir el conocimiento de instalación y gestión de redes malladas inalámbricas y capacitar para su uso. En el **Apéndice D** se trata el tema de los talleres de capacitación.

Para el estudio de los protocolos Batman-adv y 802.11s en redes malladas, se van a realizar algunas pruebas previas en un ambiente cerrado de laboratorio y posteriormente vamos a desplegar una red experimental en campo para poder obtener datos reales y empíricos acerca del rendimiento que tiene cada protocolo. El escenario elegido será un valle altoandino situado la provincia de Huancavelica, Perú. A continuación procederemos a relatar los detalles de la implementación.

## 3.2. Hardware y Software usado

### Hardware:

Para el despliegue de la red experimental, usaremos como nodos los equipos **Ubiquiti Nanostation M5**. Estos equipos trabajan a 5.8 GHz con el estándar 802.11n (Wifi). Poseen antenas directivas propias, así como dos puertos Ethernet (10/100 Base Tx) y con un procesador Atheros AR71xx con arquitectura MIPS 24KC (target name ar71xx, big endian, 400 Mhz). Estos equipos suelen costar alrededor de unos 70 €. Se incluye información detallada del equipo en el **Apéndice E**. También se ha trabajado con equipos Nanostation 5, y aunque no se han usado para realizar el estudio de los protocolos, se han incluido en los manuales de configuración del **Apéndice B**.

Para realizar las pruebas de rendimiento usaremos ordenadores portátiles cuyas especificaciones son las siguientes:

- Equipo1: Dell Vostro 131  
OS:Debian 6.0.6 (sid) Kernel 3.2.0-4-amd64  
Proc:Intel Core i5  
RAM: 4 GB.
  
- Equipo2: Sony Vaio  
OS:Windows 7  
Proc:Intel Atom  
RAM: 2 GB.
  
- Equipo3: HP pro book 4710s  
OS:Windows 7  
Proc:Intel Centrino Core 2 Duo  
RAM: 4 GB.
  
- Equipo4: HP pro book 4710s  
OS:Windows 7  
Proc:Intel Centrino Core 2 Duo  
RAM: 4 GB.

### **Software:**

El equipo Nanostation M5 viene con un *firmware* original llamado AirOS<sup>1</sup>. Aunque este sistema operativo es bastante intuitivo y permite realizar la mayoría de las tareas de gestión comunes, no tiene la capacidad de trabajar con redes ad-hoc, por lo que para realizar nuestro estudio, procederemos a cambiar su firmware por uno que nos permita configurar nuestra red mallada. El firmware elegido es OpenWrt<sup>2</sup>, una potente distribución de software libre basada en linux que permite trabajar con equipos de bajos recursos. El trabajar con esta distribución nos permite tener un control total sobre el equipo. OpenWrt crea un nuevo sistema de ficheros y en él podemos configurar directamente los drivers de las tarjetas del nodo e instalar una gran cantidad de software adicional gracias a un sistema de gestión de paquetes. Por ejemplo, mediante OpenWrt podemos instalar en un equipo relativamente modesto servidores ligeros de http, Samba, CUPS, DNS, etc. . .

Por ello, es necesario descargarnos el proyecto, compilar OpenWrt con una determinada configuración y posteriormente instalarlo en los nodos. En el **Apéndice A** se detalla dicha configuración, compilación e instalación de las imágenes OpenWrt en los equipos Nanostation M5.

---

<sup>1</sup><http://www.ubnt.com/airos>

<sup>2</sup><https://openwrt.org/>

El software usado en las computadoras portátiles será *iperf* y *ping* para medir el parámetros de funcionamiento de la red, y *Ekiga* y *Mumble* para comprobar la respuesta de la red con tráfico multimedia.

### 3.3. Configuración de protocolos 802.11s y Batman-adv en los equipos

Una vez que los nodos tienen el firmware cargado es necesario realizar una configuración inicial para que los nodos puedan crear la red mallada. Hemos de establecer 2 configuraciones, una para Batman-adv y otra para 802.11s. Debido a que ambos protocolos trabajan en el nivel 2 OSI, para hacer que los nodos formen la red mallada hay que modificar las interfaces de forma que el protocolo sea quien las gestione. Adicionalmente si queremos interconectar redes a la malla inalámbrica tendremos que crear un *bridge* entre ellas (puentear algunas interfaces de forma virtual).

Todas estas configuraciones se detallan en el **Apéndice B**, donde se explica para cada protocolo qué ficheros se han de modificar y qué comandos hay que ejecutar. En dicho apéndice también se explica cómo monitorizar la red mediante comandos específicos de cada protocolo de modo que se pueda mantener un conocimiento en cualquier momento sobre la topología de la red, así como de la calidad de los enlaces.

### 3.4. Definición de pruebas y variables de interés

Para el estudio y comparación de los protocolos nos vamos a centrar en el funcionamiento a nivel de aplicación que recibe el usuario. Para medir el rendimiento que da la red se van a utilizar 3 parámetros:

- Ancho de banda disponible (*throughput*). Se trata de la cantidad de información que un elemento de red puede enviar en un periodo de tiempo. En nuestro caso se traducirá en la velocidad que nos da la red hacia distintos destinos. Se analizará para 1 y 2 saltos inalámbricos. Para medir el *throughput* usaremos el software *iperf*, en modo UDP, un tamaño de paquete de 1024 bytes y un ancho de banda máximo de 200Mbps. Para poder usar *iperf* debemos de asignar un PC como servidor y otro como cliente. Unidades: Mbps
- Retardo o latencia. Es el tiempo de demora sufrido por un paquete desde que se empieza a enviar hasta que se recibe completamente.

El retardo viene dado generalmente por el tiempo de propagación y el tiempo de transmisión de los paquetes dentro de la red. Nosotros analizaremos el retardo total que sufren los paquetes para 1 y 2 saltos. Para medir el retardo usaremos la utilidad *ping*. Unidades: milisegundos

- Variación de retardo (*jitter*). El *jitter* es la variabilidad temporal del retardo que sufren los paquetes al atravesar la red. El hecho de que algunos paquetes lleguen antes que otros se produce debido la propia naturaleza de los sistemas de comunicaciones basados en conmutación de paquetes. Para medir el *jitter* usaremos el software *iperf*. Unidades: milisegundos

Uno de los objetivos del proyecto era comprobar en el laboratorio la respuesta de ambos protocolos para determinados cambios de topología y analizar tiempos de reencaminamiento, paquetes perdidos, efectos de *flapping*, efectos en el rendimiento del sistema ante cambios, etc... Dichas pruebas no son posibles a priori debido a que los protocolos interconectan los nodos todos con todos con 1 solo salto, lo que impide realizar dichas pruebas.

Sin embargo, 802.11s provee una herramienta para configurar una topología concreta mediante bloqueo de rutas o nodos. Lamentablemente Batman-adv no posee una herramienta que permita realizar esto. Un posible opción hubiera sido filtrar los OGM mediante *eatables*, el equivalente de *iptables* del nivel del enlace. Dicho software puede filtrar tramas según direcciones MAC, pero tiene el inconveniente de que sólo puede trabajar sobre un *bridge* (interfaz puente). Sin embargo, debido a que el *driver* (o controlador) usado por las Nanostation M5 *mac80211* no permite la operación de añadir una interfaz wlan0 a un *bridge* ethernet, no es posible usar *eatables* para configurar nuestra topología. Sería necesario realizar el filtrado desde la interfaz *bat0* de Batman-adv, lo que requeriría la modificación del código de Batman-adv creando un parche adicional, y realizar una posterior compilación y instalación del protocolo en los nodos. Debido a que al realizar esto nos desviaríamos demasiado sobre la temática del proyecto, se ha decidido obviar las pruebas sobre cambios de topología en entornos cerrados, ya que no obtendríamos resultados útiles al realizar las pruebas sólo con uno de los protocolos.

Las pruebas de campo si permiten la creación de una determinada topología por medio del control de potencia y posicionamiento de las antenas. De esta forma, sólo se establecerían los enlaces que tuvieran un mínimo de potencia recibida. Sin embargo, en nuestro caso, las pruebas de campo nos limitan a la hora de situar nuestros nodos en los lugares que deseemos, ya que sólo podremos instalarlos en unos determinados lugares provistos de energía. Por lo tanto, hemos descartado las pruebas basadas en cambios de topología y nos hemos centrado en las de rendimiento ofrecido al nivel de usuario.

### 3.5. Pruebas en laboratorio

El trabajo de laboratorio se ha centrado en el estudio, instalación y configuración de los protocolos de encaminamiento Batman-adv y 802.11s en los nodos Nanostation M5.

Una vez que los nodos han quedado operativos, se han hecho pruebas de velocidad entre dos nodos para comprobar cual es el límite máximo de *throughput* que la red puede dar en condiciones óptimas. De esta manera podremos comparar el rendimiento máximo de los equipos con el rendimiento en entornos reales.

Estas condiciones óptimas se han obtenido limitando el número de nodos de la red a 2 para disminuir las interferencias, usando el canal 157 (5.785 GHz), el cual según el análisis espectral del laboratorio era menos usado y bajando la potencia de transmisión de las antenas a 0 dBm para evitar la saturación en el enlace. A los dos nodos Nanostation M5 se conectaron el Equipo1 y el Equipo3 mediante cableado ethernet. En la Figura 3.1 se muestra el montaje.

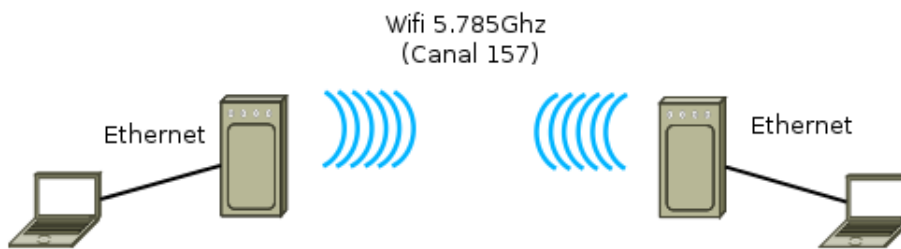


Figura 3.1: *Escenario de prueba enlace óptimo*

Se realizaron medidas mediante *iperf* y *ping* para comprobar el rendimiento del enlace y los resultados se muestran la Figura 3.2 y en la Figura 3.3:

```
root@orion:/home/emunicio# iperf -s --udp -l 1024
-----
Server listening on UDP port 5001
Receiving 1024 byte datagrams
UDP buffer size: 224 KByte (default)
-----
[ 3] local 1.1.1.11 port 5001 connected with 1.1.1.10 port 44468
[ ID] Interval   Transfer  Bandwidth   Jitter  Lost/Total Datagrams
[ 3] 0.0-10.0 sec 112 MBytes 93.7 Mbits/sec 0.283 ms 199/114639 (0.17%)
```

Figura 3.2: *Rendimiento para un enlace trabajando con Batman-adv*

```
root@orion:/home/emunicio# iperf -s --udp -l 1024
-----
Server listening on UDP port 5001
Receiving 1024 byte datagrams
UDP buffer size: 224 KByte (default)
-----
[ 3] local 5.5.5.20 port 5001 connected with 5.5.5.21 port 1460
[ 3] 0.0-10.3 sec 115 MBytes 93.6 Mb/s 2.932 ms 1/117994 (0.00085%)
```

Figura 3.3: Rendimiento para un enlace trabajando con 802.11s

Vemos que se obtiene una gran velocidad acorde con la que ofrece el estándar 802.11n. Para ambos protocolos se obtienen velocidades prácticamente idénticas, aunque se aprecia que para Batman-adv el *throughput* es ligeramente superior, y que sin embargo, las pérdidas son algo más pequeñas con 802.11s. Se realizaron varias mediciones y los resultados fueron muy similares. Estas mediciones nos sirven para establecer un techo máximo al que atenarnos cuando realicemos las pruebas en un escenario real y así poder discernir cuando analicemos los resultados si los valores obtenidos están dentro de lo esperado.

## 3.6. Pruebas en terreno: Huancavelica-Lachocc

En septiembre de 2012 se programó una salida a la ciudad de Huancavelica, para la implementación de la red experimental y realización de pruebas de campo. Las red se desplegó en Lachocc, un anexo de Huancavelica.

### 3.6.1. Contexto y descripción del escenario

Huancavelica es la capital del departamento de Huancavelica, una región situada en el centro del país, en la sierra alta. Está situada en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, a orillas del río Ichu, afluente del Mantaro.

Huancavelica es una de las provincias más pobres de Perú, cuyo Índice de Desarrollo Humano es de 0,54. Es una de las pocas provincias donde a pesar del aumento de las inversiones públicas y extranjeras, la pobreza no se reduce sino que se incrementa ligeramente. La mayor parte de la pobreza de la región de Huancavelica se encuentra en la zona rural, y es en su mayor parte debida a la baja productividad agrícola y ganadera, la desnutrición infantil, el deficiente acceso a la educación de calidad, el aislamiento debido a la falta de infraestructuras y las barreras culturales. Cabe destacar que existen también



Figura 3.4: *Región de Huancavelica*

grandes problemas ambientales, originados por años de explotación minera incontrolada. Muchos de los ríos todavía están altamente contaminados, lo que priva de muchas zonas de actividad agrícola y ganadera. Es por ello que la principal actividad económica de la región sea la minería.

Sin embargo, Huancavelica actualmente recibe considerables ayudas del gobierno debido al Canon Minero, al Canon Energético o al Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea(FOCAM). Dichos fondos provienen de empresas privadas, que tienen que pagar un canon o regalía por la explotación de los recursos de la región para favorecer su desarrollo. Aunque la ejecución de proyectos desarrollo en Huancavelica es lenta y se concentra en los proyectos de obra civil e infraestructuras, en la Universidad Nacional de Huancavelica(UNH) se están realizando diversos proyectos de investigación sobre zootecnia. Estos proyectos se centran en el estudio de los camélidos suramericanos, principalmente llamas, alpacas y vicuñas y se desarrollan en centros de investigación distribuidos en las zonas altas de la sierra, inmersos en los hábitats de los camélidos. Uno de estos centros de investigación está situado en Lachocc, a 20 kilómetros de Huancavelica. Por ello, nuestro proyecto está pensado para ofrecer soluciones y soporte TIC a los proyectos de investigación de la UNH.



Lachocc es una comunidad campesina, de unos 100 habitantes aproximadamente, donde las viviendas están bastante alejadas unas de otras estando ubicadas a una altura de entre 4300 hasta 4700 metros sobre el nivel del mar. Aunque la distancia entre Lachocc y Huancavelica no es mucha, el viaje de ida dura aproximadamente una hora debido a la difícil orografía del terreno. El centro de investigación y desarrollo de camélidos sudamericanos de Lachocc (Figura 3.5) está compuesto por unas instalaciones principales y un grupo de casas dispersas por el valle. El centro mantiene a trabajadores permanentemente en las instalaciones principales, pero también acoge a familias de pastores que se dedican a la cría de llamas y alpacas en el resto de las viviendas del valle.

Los proyectos sobre camélidos sudamericanos que se desarrollan en el centro de investigación de Lachocc han solicitado soporte TIC para realizar tareas de gestión y contabilidad de cabezas de ganado, así como de la monitorización de los camélidos en la pampa, especialmente en el caso de las vicuñas. Esto se traduce en una mejora de los procesos de producción, ya que se controlará la población de camélidos de una forma más precisa, detectando las variables de las que depende, como depredadores, mala calidad del agua, zonas con temperaturas extremas para la cría, etc. . .



Figura 3.5: *Centro de Investigación y Desarrollo de camélidos sudamericanos*

Para ello se ha propuesto el uso de tecnologías RFID (Identificación por radiofrecuencia) para contar e identificar a los camélidos y redes malladas de sensores que transmitan datos sobre la ubicación de los camélidos mediante GPS o triangulación de antenas e incluso algunos parámetros adicionales

como temperatura o grado de humedad. Adicionalmente, se considera que las familias que residen en las casas del valle tienen un alto índice de aislamiento, por lo que desde la UHN ha considerado necesario establecer conectividad entre las casas para facilitar la comunicación con las familias y la gestión de sus manadas de camélidos.

Por ese motivo, se desplegará una red mallada inalámbrica que de soporte y sirva como herramienta a los proyectos de investigación en zootecnia y de conectividad a los habitantes de Lachocc en el futuro. De esta manera existirá una comunicación entre las instalaciones principales del centro de investigación con el resto de las casas del valle que formen parte de la red mallada. Se pretende que todas las viviendas del valle y los edificios de las instalaciones principales del centro de investigación funcionen cada una como un nodo de la red mallada. En un futuro se pretende centralizar los datos en Huancavelica y dar salida a la red hacia el exterior mediante un enlace punto a punto que una las instalaciones principales del centro de investigación con la UNH ubicada en la ciudad a 20 kilómetros de distancia.

### 3.6.2. Descripción del escenario

Nuestro proyecto implementa una red mallada inalámbrica experimental usando como nodos algunas de las casas del valle, sin dar conectividad hacia las instalaciones principales aún. Esto permite realizar algunas pruebas empíricas antes de desplegar completamente la red. El escenario propuesto se refleja en la Figura 3.6

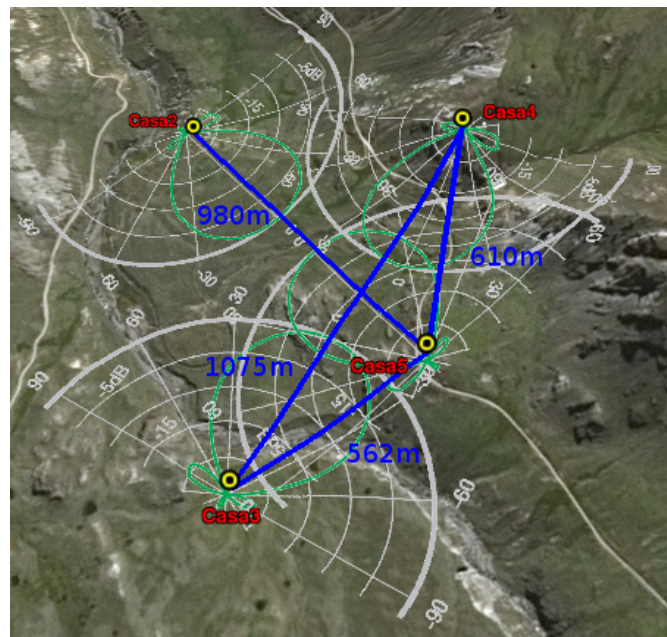


Figura 3.6: *Escenario de la red mallada inalámbrica experimental*

En la red existen 4 nodos, en los que se conectan todos con todos menos el nodo Casa2, el cual sólo tiene conexión con el nodo Casa5. Una topología simplificada se puede apreciar en la Figura 3.7, donde se muestran las direcciones IP de las computadoras y el último dígito de las direcciones MAC de cada nodo de la red mallada. La malla representa un *hub* (o concentrador de red) virtual donde las computadoras portátiles tendrán la visión de que el resto de computadoras están a un solo salto a nivel IP, aunque en realidad estén a tres o cuatro saltos físicos.

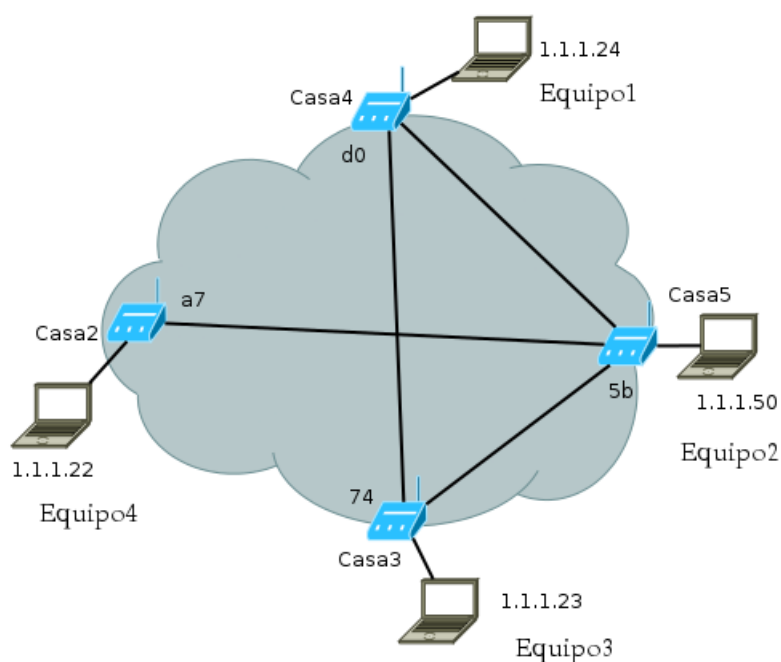


Figura 3.7: Topología de la red mallada inalámbrica experimental

### 3.6.3. Despliegue y realización de pruebas

Tras un reconocimiento del terreno y estudio de la ubicación de las casas, se diseñó cómo sería el despliegue de la red acorde con el equipamiento y recursos disponibles. En cada vivienda existe un equipo fotovoltaico que da energía a la antena y a la computadora portátil. En algunas de las casas los equipos no funcionan correctamente, por lo que es necesario llevar baterías, compensador de carga y paneles adicionales para poder realizar las pruebas.

En las siguientes tablas se muestran los datos correspondientes a la configuración física de la red. Dicha configuración viene dada por las coordenadas de la ubicación de las antenas, su apuntamiento<sup>3</sup> y las potencias recibidas desde el resto de antenas. En la Tabla 3.1 se muestra la ubicación de cada nodo, en la Tabla 3.2 se muestra la longitud de cada enlace y en la Tabla 3.3 se muestra el nivel de potencia media recibida en cada antena desde las otras antenas.

-	Longitud	Latitud	Apuntamiento
Casa2	-75° 6' 4.20"	-12° 51' 30.0"	170.5°
Casa3	-75° 6.17' 17.5"	-12° 52' 1.9"	62.6°
Casa4	-75° 5.45 '45.6"	.12° 51.45' 90.0"	242.7°
Casa5	-75° 5' 59.0"	-12° 52' 1.0"	350.5°

Tabla 3.1: Datos de la ubicación de las antenas

Enlace	Longitud
Casa2 - Casa5	980m
Casa3 - Casa4	1075m
Casa4 - Casa5	610m
Casa5 - Casa4	562m

Tabla 3.2: Longitud de cada enlace de la red

-	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Casa2	X	*	*	-68dBm
Casa3	*	X	-59dBm	-74dBm
Casa4	*	-63dBm	X	-68dBm
Casa5	-69dBm	-75dBm	-69dBm	X

Tabla 3.3: Potencias recibidas de cada antena

Las computadoras portátiles se conectaron a las antenas ubicadas en el exterior mediante cables UTP Categoría 5 de 30 metros de longitud. Aunque existe cierta disminución del *throughput* debido a la atenuación del cable UTP, no se considera muy importante, ya que previamente se había comprobado en el laboratorio que las medidas de *throughput* eran parecidas usando un cable UTP de 3 metros. Las antenas fueron colocadas sobre postes o en los tejados de las casas a una altura aproximada de dos metros. Para los 4 enlaces, entre antena y antena existía línea directa de visión sin ningún obstáculo entremedias y durante las pruebas el cielo se mantuvo soleado.

<sup>3</sup>Ángulo de apuntamiento respecto al Norte



Figura 3.8: Vista desde el nodo Casa4 hacia Casa5(izquierda) y Casa3(Derecha)

Todas las pruebas se monitorizaron desde el nodo Casa4. Para la realización de dichas pruebas, se usó un *script* (programa de automatización de tareas) que automatizó el procedimiento de medida de las variables de interés. Este *script* es *testbench.sh* está incluido en el **Apéndice F**. Este *script* lanza los comandos *iperf* y *ping* repetidas veces hacia un determinado destino. El comando *ping* se ejecuta 20 veces hacia todos los equipos, ya sean computadoras o antenas, mientras que el *iperf* solo se lanza 5 veces contra las computadoras. Para el caso de *iperf*, era necesario que en Equipo2, Equipo3 y Equipo4 estuviera funcionando *iperf* en modo servidor. Posteriormente estos datos se han agrupado formando varias rutas para poder realizar un estudio comparativo del rendimiento según el número de saltos. En el **Apéndice F** también se incluyen el *script*, *topology.sh*, el cual se han creado para generar automáticamente una imagen con la topología de la red. Este *script* simplemente nos permite comprobar que la topología creada es la esperada. Todos estos *scripts* funcionan solamente en equipos basados en Unix. El funcionamiento y las instrucciones de uso para cada uno de los *scripts* también viene detallado en el **Apéndice F**.

Por último se realizaron con éxito pruebas con aplicaciones reales. Para ello se usó el software *Ekiga* y *Mumble* para realizar videollamadas y chat interactivo entre todas las casas. También se comprobó la conectividad entre un equipo lector RFID y una computadora ubicados en nodos distintos, que es uno de los proyectos de investigación paralelos a este proyecto.

### 3.7. Conclusiones y resultados preliminares

Tanto el despliegue de la red como la realización de pruebas no generaron importantes problemas. Se realizaron pruebas de *throughput*, retardo y *jitter* así como se comprobó el funcionamiento de las videollamadas entre las viviendas. Se obtuvieron correctamente los datos sobre la topología de la red, la métrica usada por los protocolos y los niveles de potencia recibida en cada antena.

Sin embargo existieron algunos problemas de poca importancia, como la existencia de obras en la carretera de acceso que generalmente provocaban demoras de hasta una hora, cierta descoordinación con los pastores que vivían en la casa y algunos problemas debido a la lluvia. Solo una de las casas tiene acceso directo mediante vehículo, por lo que para acceder al resto de casas es necesario caminar cierta distancia. Esto acarrea ciertos problemas de logística debido a que transportar el equipo hasta las ubicaciones de las viviendas se torna difícil por la menor densidad del aire a estas alturas.

A primera vista, no se han apreciado grandes cambios entre el rendimiento de la red usando Batman-adv y 802.11s por lo que se determinó que no se podrán sacar ninguna conclusión hasta analizar detalladamente los resultados arrojados por las pruebas.

# Capítulo 4

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Comparación del comportamiento de Batman-adv y 802.11s

Una vez realizadas las pruebas, se va a realizar un estudio comparativo del rendimiento que ofrecen ambos protocolos trabajando en la misma red. Primero analizaremos los datos obtenidos para Batman-adv y después los datos obtenidos para 802.11s para finalmente hacer una comparación.

#### Batman-adv

Con la configuración física establecida, Batman-adv calculó las rutas a partir de su métrica basada en una ventana deslizante. Las métricas para los enlaces se muestran en la tabla de originadores de cada nodo. Dicha información se muestra en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4. Se ha resaltado el último dígito de las direcciones MAC de cada nodo para facilitar su identificación. Como es de suponer, cada antena tiene guardado las direcciones hacia el resto de las antenas ya que cada nodo, aunque no conoce la topología total de la red, si conoce cual es el mejor salto hacia cualquier nodo destino. En el **Apéndice B** se detallan los comandos necesarios para ver estas tablas.

Casa2 02:27:22:53:71:a7				
Originator	last-seen	(# /255)	Nexthop	[outgoingIF]
00:27:22:52:78:d0	0.180s	(225)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]
00:27:22:56:44:5b	0.300s	(255)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]
00:27:22:52:73:74	0.490s	(224)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]

Tabla 4.1: Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa2

Casa3 00:27:22:52:78:d0				
Originator	last-seen	(# /255)	Nexthop	[outgoingIF]
00:27:22:52:78:d0	0.570s	(183)	00:27:22:52:78:d0	[wlan0]
00:27:22:56:44:5b	0.710s	(255)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]
00:27:22:52:71:a7	0.090s	(225)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]

Tabla 4.2: Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa3

Casa4 00:27:22:52:73:74				
Originator	last-seen	(# /255)	Nexthop	[outgoingIF]
00:27:22:52:71:a7	0.410s	(214)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]
00:27:22:56:44:5b	0.070s	(243)	00:27:22:56:44:5b	[wlan0]
00:27:22:52:73:74	0.410s	(248)	00:27:22:52:73:74	[wlan0]

Tabla 4.3: Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa4

Casa5 00:27:22:56:44:5b				
Originator	last-seen	(# /255)	Nexthop	[outgoingIF]
00:27:22:52:78:d0	0.710s	(225)	00:27:22:52:78:d0	[wlan0]
00:27:22:52:71:a7	0.710s	(255)	00:27:22:52:71:a7	[wlan0]
00:27:22:52:73:74	0.580s	(225)	00:27:22:52:73:74	[wlan0]

Tabla 4.4: Tablas de originadores de Batman-adv del nodo Casa5

En las tablas podemos observar los valores *Originator*, que es el nodo que envió el OGM, el cual sirve para calcular las rutas, *last-seen* que es el tiempo en el que se recibió el último OGM, *(# /255)* que es el valor de la métrica, *Nexthop*, que es la dirección del siguiente nodo hacia un determinado Originador, y *[outgoingIF]* que es la interfaz de salida hacia la ruta. En nuestro caso, todos los nodos usan la misma interfaz *wlan0*. En algunos enlaces, la métrica tiene el valor máximo (255) pero en otras rutas, existen enlaces con menos calidad y donde existe pérdida de paquetes. Esto se refleja en que la métrica es menor que 255. Las tablas de originadores también proporcionan información sobre cuál es el segundo mejor próximo salto. Dicha información no la hemos mostrado, pero es interesante comprobar que en caso de que la primera opción quede indisponible, el segundo mejor próximo salto es siempre el que tiene la segunda mejor métrica.



**802.11s**

Al igual que con Batman-adv, una vez cargada la configuración de 802.11s obtenemos las tablas de rutas de los nodos. El modo de funcionamiento de 802.11s fue el basado en RM-AODV. En el **Apéndice B** se detallan los comandos necesarios para ver estas tablas.

Casa2 02:27:22:53:71:a7				
DEST ADDR	NEXT HOP	IFACE	SN	METRIC
00:27:22:52:73:74	00:27:22:56:44:5b	meshif	103	1402
00:27:22:52:78:d0	00:27:22:56:44:5b	meshif	6	457
00:27:22:56:44:5b	00:27:22:56:44:5b	meshif	18	61

Tabla 4.5: Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa2

Casa3 00:27:22:52:73:74				
DEST ADDR	NEXT HOP	IFACE	SN	METRIC
00:27:22:52:78:d0	00:27:22:52:78:d0	meshif	11	106
00:27:22:52:71:a7	00:27:22:56:44:5b	meshif	7	725
00:27:22:56:44:5b	00:27:22:56:44:5b	meshif	24	421

Tabla 4.6: Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa3

Casa4 00:27:22:52:78:d0				
DEST ADDR	NEXT HOP	IFACE	SN	METRIC
00:27:22:52:71:a7	00:27:22:56:44:5b	meshif	7	1146
00:27:22:52:73:74	00:27:22:52:73:74	meshif	122	51
00:27:22:56:44:5b	00:27:22:56:44:5b	meshif	31	421

Tabla 4.7: Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa4

Casa5 00:27:22:56:44:5b				
DEST ADDR	NEXT HOP	IFACE	SN	METRIC
00:27:22:52:78:d0	00:27:22:52:78:d0	meshif	18	152
00:27:22:52:71:a7	00:27:22:52:71:a7	meshif	7	152
00:27:22:52:73:74	00:27:22:52:73:74	meshif	132	1261

Tabla 4.8: Tabla de rutas de 802.11s del nodo Casa5

Las tablas poseen los campos de *DEST ADDR*, la dirección a un determinado destino, *NEXT HOP*, el siguiente salto establecido para ese destino, *IFACE*, la interfaz de salida hacia ese destino, *SN*, el número de secuencia del último paquete PREQ recibido y *METRIC*, la métrica basada en Airtime que usa 802.11s. Esta métrica es la acumulación de la métrica de cada enlace hasta un determinado destino. Como hemos comentado en el capítulo 2.3.3, esta métrica depende del nivel MCS. El nivel de enlace adapta la tasa de transmisión para obtener un enlace con menos pérdidas a costa de usar un esquema de modulación menos eficiente. Por ello podemos ver qué tasa de transmisión ha sido usada para obtener una determinada métrica por medio de la fórmula:

$$c_a = \left[ 1 + \frac{8192}{r} \right]$$

Donde hemos dado  $O_l + O_p$  el valor de 1, y hemos obviado la tasa de error. Así pues, por ejemplo, para una métrica de valor 152 vemos que para ese destino se tiene una velocidad de 54.0 MBit/s, que corresponde a un MCS de 9 (usando una modulación de QPSK). Sin embargo existe la problemática de que debido a la continua variación de la potencia recibida en cada antena, el MCS está variando constantemente, por lo que la métrica varía también con frecuencia.

### Análisis del Retardo

Para medir el retardo, hemos establecido 3 rutas y hemos agrupado las medidas arrojadas por el comando *ping* según estas rutas. Éstas rutas se muestran en la Figura 4.1

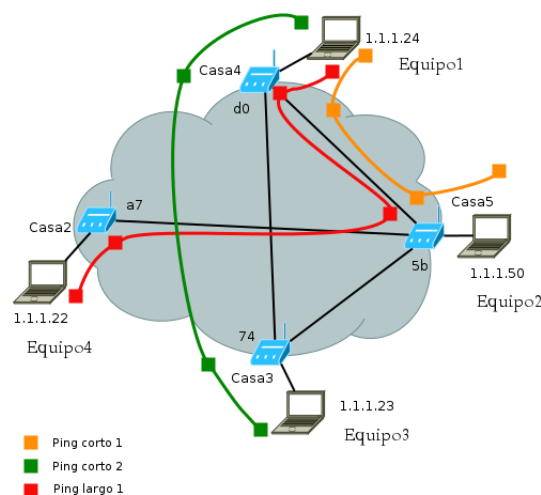


Figura 4.1: Rutas usadas para la medición del retardo

Se han realizado 20 pings por nodo/computadora y se ha promediado, obteniendo los valores máximos, mínimos y medios. En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los retardos medios que hemos obtenido a partir del comando *ping* para ambos protocolos. Vemos que, lógicamente, se va añadiendo un retardo significativo por cada salto adicional:

Ruta **Ping corto 1**: Equipo1 → Casa4 → Casa5 → Equipo2

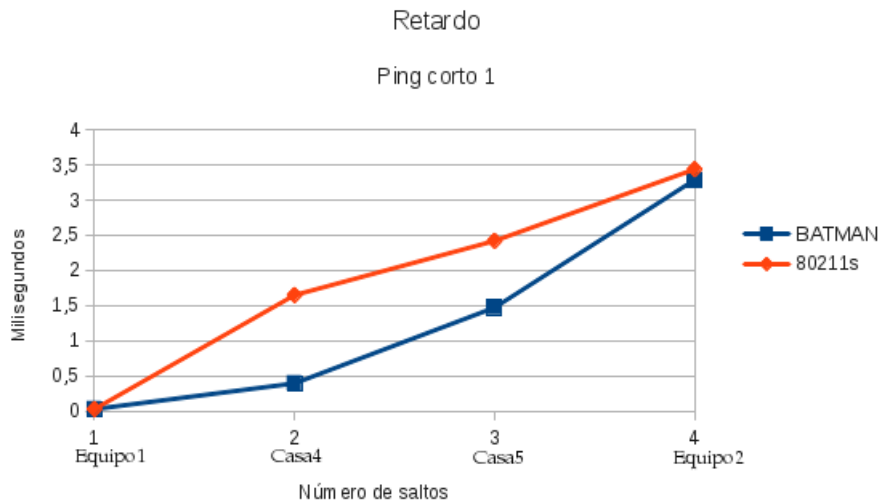


Figura 4.2: Acumulación de retardo por número de saltos en la ruta *Ping corto 1*

Ruta **Ping corto 2**: Equipo1 → Casa4 → Casa3 → Equipo3

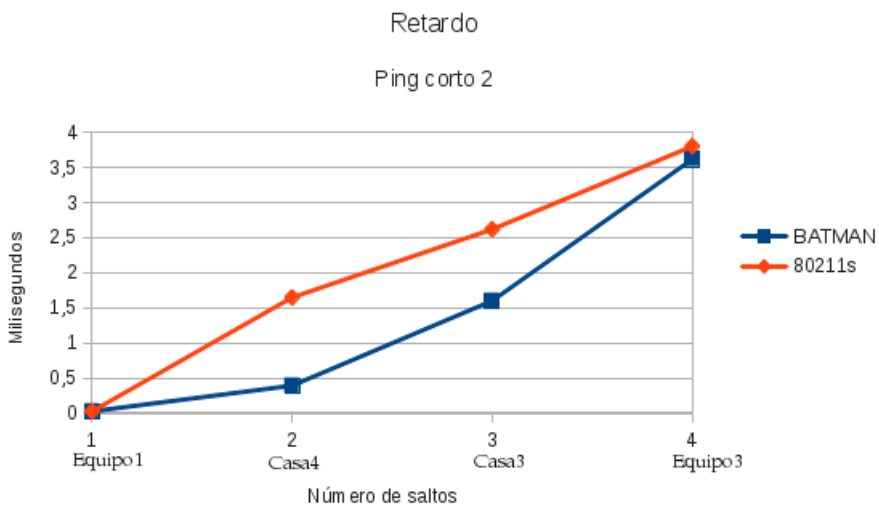


Figura 4.3: Acumulación de retardo por número de saltos en la ruta *Ping corto 2*

Ruta **Ping largo 1**: Equipo1 → Casa4 → Casa5 → Casa2 → Equipo4

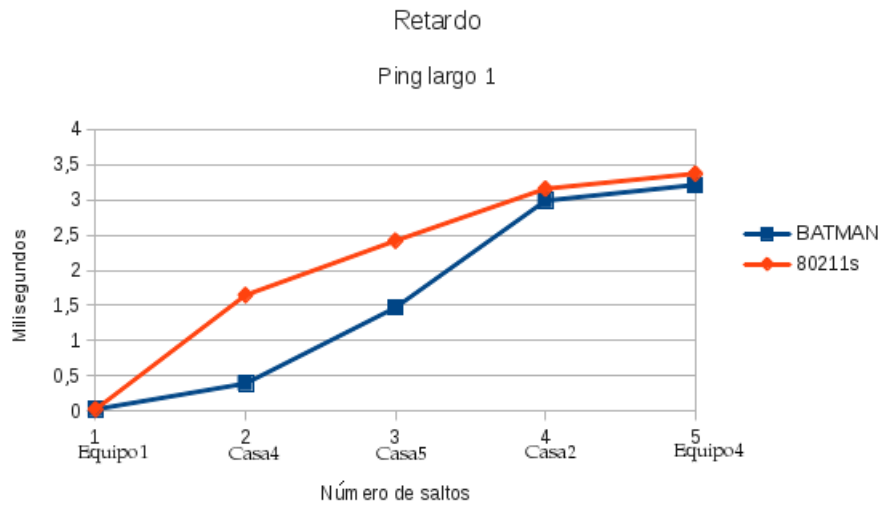


Figura 4.4: Acumulación de retardo por número de saltos en la ruta Ping largo 1

Para las 3 pruebas de retardo, vemos que los valores son menores de 4 milisegundos. El retardo que ofrecen ambos protocolos es muy similar en las rutas Ping corto 1 y Ping corto 2, siendo Batman-adv el protocolo que ofrece un menor retardo. En la ruta Ping largo 1, el retardo total hasta el último nodo es parecido al de las rutas Ping corto 1 y Ping corto 2, siendo Batman-adv también en esta ruta, el protocolo que ofrece un menor retardo. Se puede apreciar que con el protocolo Batman-adv existe en el último salto un retardo similar, aunque ligeramente menor al que existe con 802.11s. Sin embargo se aprecia una mayor diferencia entre Batman-adv y 802.11s en los primeros saltos.

Todos los retardos obtenidos se muestran en la Tabla 4.9

Número de saltos	1		2		3		4	
-	Bat	802.11s	Bat	802.11s	Bat	802.11s	Bat	802.11s
Máx	0.77	3.29	2.84	5.25	4.74	5.40	6.70	4.21
Avg	0.39	1.64	1.53	2.51	3.29	3.46	3.21	3.5
Mín	0.33	1.38	1.33	1.25	1.81	1.82	2.43	2.97

Tabla 4.9: Retardos obtenidos por salto

En la Tabla 4.9 podemos observar que existe un menor retardo medio cuando la red trabaja con Batman-adv, pero en algunos casos, el retardo máximo y el retardo mínimo es menor cuando la red trabaja con el protocolo 802.11s.

### Análisis del *Throughput*

Para medir el *throughput* se cuenta con las mediciones obtenidas a partir de la utilidad *iperf*. Se han realizado 5 medidas por cada computadora, y se han tomado los valores máximos, mínimos y medios. Las rutas que se han seguido han sido las mismas que para el estudio del retardo, mostradas anteriormente en la Figura 4.1. Éstas han sido Ruta ping corto 1 hacia el Equipo2, Ruta ping corto 2 para el Equipo3 y Ruta ping largo 1 hacia el Equipo4.

En la Figura 4.5 se muestra la variación del *throughput* máximo con el número de saltos para ambos protocolos.

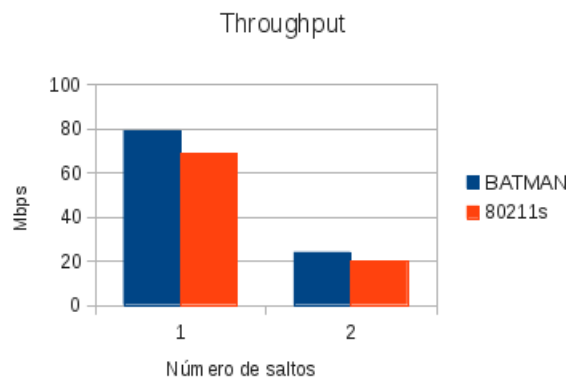


Figura 4.5: Variación del *throughput* máximo según el número de saltos

Vemos que se obtienen mayores velocidades cuando la red trabaja con Batman-adv que cuando lo hace con 802.11s. Para 2 saltos la diferencia entre ambos protocolos no es muy grande, pero para 1 sólo salto claramente Batman-adv ofrece un mayor *throughput* que 802.11s. Además se observa que efectivamente se cumple de manera aproximada la hipérbola de degradación del *throughput* con el número de saltos dada por la fórmula:

$$Throughput = \frac{ThroughputMax}{N}$$

Todas las mediciones de *throughput* se muestran en la Tabla 4.10

PCs	Equipo2			Equipo3			Equipo4		
	Máx	Avg	Mín	Máx	Avg	Mín	Máx	Avg	Mín
Batman-adv	82.20	80.56	78.10	75.90	34.87	17.69	23.9	18.77	11.23
802.11s	73.7	68.05	62.40	63.80	57.86	46.1	19.9	16.70	13.45

Tabla 4.10: *Throughput* en Mbps obtenidos hacia las tres computadoras desde Equipo1

Vemos que los valores máximos son siempre mayores con Batman-adv, pero no siempre es así con los valores medios y mínimos.

### Análisis del *Jitter*

Por último, se muestran los valores obtenidos del *jitter* en la red. Estos valores se obtuvieron a la vez que las medidas de *throughput*, ya el resultado de ejecutar *iperf* da tanto los valores de *throughput* como los de *jitter*. En la Figura 4.6 se muestra la variación del *jitter* promedio con el número de saltos para ambos protocolos.

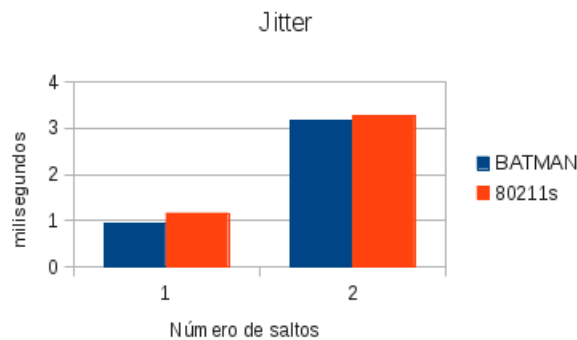


Figura 4.6: Variación del *jitter* promedio según el número de saltos

Vemos que se obtienen un menor *jitter* cuando la red trabaja con Batman-adv que cuando lo hace con 802.11s. El *jitter*, como era de esperar, aumenta con el número de saltos, debido a que la introducción de más elementos de red en la ruta introduce una mayor probabilidad de que los retardos no sean iguales para todos los paquetes. Todas las mediciones de *jitter* realizadas se muestran en la Tabla 4.11

PCs	Equipo2			Equipo3			Equipo4		
-	Máx	Avg	Mín	Máx	Avg	Mín	Máx	Avg	Mín
Batman-adv	6.05	1.29	0.06	1.37	0.58	0.10	4.89	3.16	1.92
802.11s	5.81	1.73	0.04	1.19	0.57	0.26	9.62	3.26	0.27

Tabla 4.11: Mediciones de *jitter* en milisegundos obtenidas hacia las tres computadoras desde Equipo1

Los valores medios de *jitter* son siempre menores con Batman-adv, pero no los valores máximos y mínimos. Vemos que 802.11s tiene un *jitter* máximo y mínimo menor que Batman-adv, aunque los valores promedio son menores en Batman-adv.

## Pruebas con aplicaciones reales

Además de medir parámetros de red, se han realizado pruebas con aplicaciones reales. Éstas han sido: videollamada, mensajería y chat interactivo y conectividad con equipos RFID.

Las videollamadas se realizaron con Ekiga y se obtuvieron conexiones de calidad entre todas las computadoras conectadas a la red mallada inalámbrica. Aunque la calidad de recepción de vídeo y audio es subjetiva ya que no se estableció un rango de calidad basado en paquetes perdidos, pixels corruptos, etc. . . , la recepción fue buena sin retardos ni ecos en el audio, y con un vídeo fluido y sin errores ni imágenes congeladas.

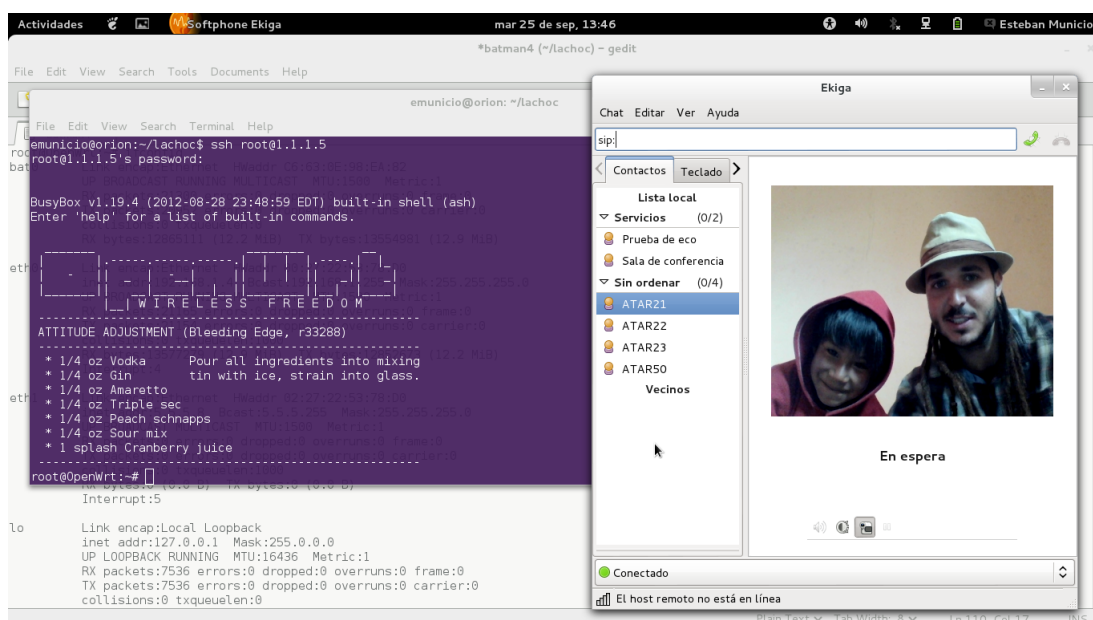


Figura 4.7: Prueba de videollamada entre computadoras usando Ekiga

El chat grupal interactivo se realizó con Mumble. Tanto la mensajería instantánea como el audio se envió y recibió correctamente.

Por último, se realizaron pruebas de conectividad entre un equipo RFID y una computadora. Una computadora situada en uno de los nodos se conectó al equipo lector RFID ubicado en otro nodo distinto y se procedió a la identificación de un chip por medio de su antena. Gracias a los bajos requerimientos de red de dicha aplicación los resultados fueron totalmente satisfactorios.

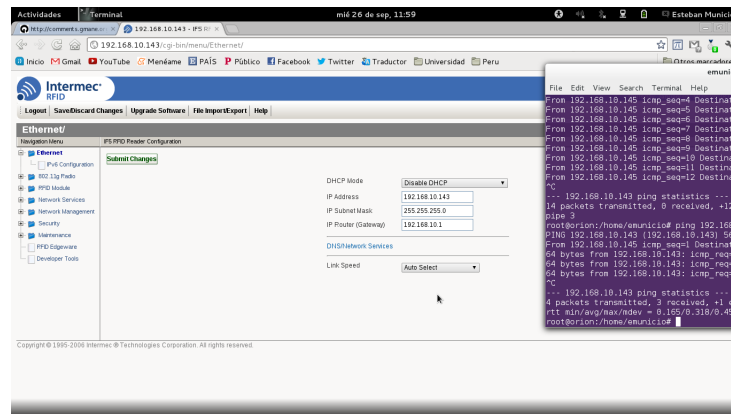


Figura 4.8: Prueba de conectividad entre una computadora y un equipo RFID

## 4.2. Conclusiones del análisis

Tras analizar los resultados, llegamos a la conclusión de que en general se observa un mejor comportamiento de la red mallada inalámbrica cuando ésta trabajaba con el protocolo Batman-adv que cuando lo hace con 802.11s. Esto puede comprobarse viendo que en Batman-adv, el retardo medio por número de saltos es menor, el *throughput* máximo es mayor, y el *jitter* medio es menor que con 802.11s. Sin embargo 802.11s para algunos casos ha dado mejor rendimiento, por ejemplo para varios saltos, el retardo máximo es menor que en Batman-adv y el *throughput* mínimo es mayor que en Batman-adv. También posee valores menores de *jitter* mínimo.

Una de las hipótesis [16] que explica este hecho es que la métrica de 802.11s se ve muy influenciada por la velocidad de transmisión del enlace. Esta velocidad depende principalmente del MCS, y éste cambia constantemente debido a la continua variación de la potencia media recibida en el canal. Estos cambios en la métrica de 802.11s pueden provocar inestabilidad en la ruta, lo cual hace que el rendimiento de la red baje, y por lo tanto, los valores de retardo, *throughput* y *jitter*. Sin embargo esto puede ser bueno en redes cuyos nodos se caen con frecuencia, y cuyas rutas cambian muy a menudo. En estos casos, debido a que 802.11s calcula su métrica con una alta periodicidad, los cambios de ruta no implican grandes problemas en la conexión, mientras que con Batman-adv la métrica es más estable, ya que se basa en la recepción de paquetes OGM del resto de los nodos.

Es importante señalar que las pruebas de campo siempre se ven influenciadas por circunstancias ajenas al protocolo de encaminamiento. Por ejemplo no se descarta que los niveles de potencia recibidos hayan podido caer drásticamente por desapuntamientos debidos al viento por ejemplo. Esto



ha podido general algunas mediciones no muy precisas. Un ejemplo puede reflejarse en que *throughput* desde Equipo1 hacia Equipo2 y Equipo3 debería ser similar ya que en ambos casos se trata de un solo salto inalámbrico, pero en Batman-adv se obtienen valores medios y mínimos demasiado bajos, por lo que se cree que la medida ha sido influenciada negativamente por factores externos al protocolo.

Otra de las razones por las que Batman-adv se comporta mejor que 802.11s es debido a que 802.11s es un estándar de reciente publicación<sup>1</sup> y sus implementaciones todavía están poco desarrolladas. Sin embargo, hemos usado una versión de Batman-adv bastante actualizada, la cual ha sido previamente probada y mejorada en gran cantidad de escenarios.

Como conclusión, podemos decir que ambos protocolos funcionan correctamente en redes malladas inalámbricas en este tipo de escenarios. Los valores de *throughput*, retardo y *jitter* ofrecidos por ambos protocolos son más que aceptables y además de posibilitar los servicios de videollamada y conectividad para los proyectos de investigación, como hemos visto, podrían dar servicio a numerosas aplicaciones adicionales, por ejemplo, aplicaciones relacionadas con la telemedicina, teleeducación o e-Government.

Sin embargo, es posible que si la red posee elevados cambios de topología y es necesario asegurar un retardo máximo menor o un *throughput* mínimo máximo para una red, sea conveniente trabajar con 802.11s, ya que su métrica responde mejor a estos cambios. Sin embargo, para redes malladas inalámbricas rurales de temática general parece que Batman-adv es la opción más conveniente.

---

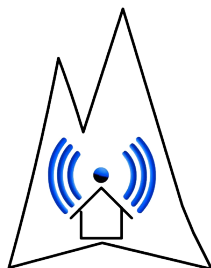
<sup>1</sup>En Julio de 2012



## Capítulo 5

# DIVULGACIÓN DEL TRABAJO DESARROLLADO

### 5.1. Proyecto MESH-RURAL



INICTEL-UNI ha creado un proyecto de red comunitaria libre llamado MESH-RURAL para la divulgación de las redes malladas inalámbricas en Perú. Para facilitar al usuario el despliegue de una red mallada inalámbrica, se ha creado una imagen propia de OpenWrt que estará a libre disposición. Esta imagen automatizará el proceso de configuración de la red de manera que el usuario sólo tenga que cargar el *firmware* en los nodos Ubiquiti Nanostation M5. Esto permite añadir un nodo a una red mallada inalámbrica en apenas unos minutos. El firmware proporcionado posee las siguientes características:

- Es posible desplegar una red mallada inalámbrica que funcione con Batman-adv y 802.11s, aunque no simultáneamente. Se provee de una configuración automática de los protocolos. El protocolo usado por defecto es Batman-adv.
- Se ajustan los parámetros de la antena de forma personalizada para ofrecer el máximo rendimiento en redes malladas inalámbricas.

- Gestiona automáticamente el direccionamiento de la red mallada inalámbrica. Se asignan direcciones IP únicas a los nodos a través de sus direcciones MAC. También se asignan a los equipos clientes que se conecten por ethernet a los nodos direcciones IP a través de DHCP.
- Lleva incluidos y configurados todos los paquetes necesarios para realizar una administración web del nodo. El tema(theme) gráfico usado en la interfaz web es *bootstrap*.

Los pasos para la instalación son los siguientes:

- Descargar la imagen desde la página web. La versión actual es la 1.0 y está en proceso de desarrollo *alfa*. El *firmware* está disponible en la [página web](#) del proyecto<sup>1</sup>. La página web es una wiki creada mediante DokuWiki <sup>2</sup>
- Una vez descargado, el usuario sólo debe cargar la imagen como se explica en el **Apéndice B**
- Una vez cargado el *firmware*, esperar unos minutos a que la instalación y la autoconfiguración finalice, y el nodo quedará operativo

Algunas consideraciones adicionales:

- Las direcciones IP de los nodos se forman siguiendo el esquema *1.M5.M6.1*, donde *M5* y *M6* serán el 5º y 6º byte respectivamente de su dirección MAC. Esto nos asegura que las direcciones prácticamente siempre serán únicas.
- Para facilitar el trabajo al usuario, se recomienda configurar el adaptador ethernet de la computadora en modo DHCP. Esto asignará a la computadora una dirección IP única en la red. Esta dirección se forma siguiendo el esquema *1.M5.M6.[5-250]*, donde *M5* y *M6* serán el 5º y 6º byte respectivamente de la dirección MAC del nodo al que se conectan. En el rango de asignación se reservan algunas IP para otros usos.
- Por defecto viene configurado el protocolo Batman-adv. Si se quiere cambiar, es necesario acceder vía *ssh/telnet* al nodo y activar el *script* que realiza el cambio de configuración. Para cambiar de Batman-adv a 802.11s hay que ejecutar los siguientes comandos:

---

<sup>1</sup><http://atar.inictel-uni.edu.pe/mesh-rural>

<sup>2</sup><https://www.dokuwiki.org/dokuwiki>

```
nodo$ sh /etc/80211s
nodo$ reboot && exit
```

Para cambiar de 802.11s a Batman-adv hay que ejecutar los siguientes comandos:

```
nodo$ sh /etc/batmanadv
nodo$ reboot && exit
```

- Para acceder a la interfaz web del nodo, hemos de poner su dirección IP en un navegador web una vez nos hayamos conectado al nodo. También se puede realizar mediante direccionamiento privado a la dirección 192.168.1.1 IP por el puerto *eth0* o a la dirección IP 1.1.1.2 por el puerto *eth1*.
- Se recomienda establecer una contraseña para la administración del nodo. Esto se puede realizar por la ventana de comandos por medio de la interfaz web. Desde la interfaz web, se nos pedirá explícitamente establecer una contraseña. Una vez que se haya establecido una contraseña, el acceso al nodo será vía *ssh* en ventana de comandos.

Aunque esta versión del proyecto cumple la mayoría de las necesidades a la hora de desplegar una red mallada inalámbrica, existen funcionalidades aún por implementar:

- No existe soporte automático para configurar una pasarela de salida a Internet. Esto se debe hacer manualmente, ya sea por medio de la interfaz web o la línea de comandos.
- El acceso de los nodos a la red mallada inalámbrica está limitado a la interfaz *eth0* de las computadoras de los usuarios, ya que la primera fase de este proyecto está pensada para dar un servicio concreto de conectividad, y no para dar servicio a un gran público. Pero en versiones futuras sería interesante que el nodo de la red mallada pueda dar servicio desde a las computadoras de su área de cobertura en modo punto de acceso inalámbrico.
- Para cambiar el protocolo de la red mallada inalámbrica es necesario conectarse mediante un terminal. Una posible mejora sería habilitar esta selección de protocolo mediante la interfaz web.
- No existe soporte específico para IPv6.
- Para establecer una configuración específica y cambiar los valores por defecto del protocolo es necesario conectarse mediante un terminal, por lo que sería interesante desarrollar en un futuro un modo de configuración del protocolo mediante la interfaz web.

- Actualmente el proyecto MESH-RURAL sólo da soporte a los equipos Nanostation M5, por lo que un trabajo futuro es generar imágenes similares para otros equipos.

## 5.2. Talleres de capacitación en telecomunicaciones rurales

Uno de los grandes inconvenientes de las zonas rurales es el difícil acceso de su población a servicios básicos como la educación, la sanidad, etc. . . Debido a este aislamiento, el conocimiento de la población sobre las TIC en estas zonas es realmente bajo en comparación con otras zonas debido principalmente al escaso acceso de las TIC. Por este motivo, es importante que cualquier proyecto de acercamiento de las TIC a las zonas rurales, ya sea a través de redes malladas inalámbricas o mediante arquitecturas tradicionales, ha de ir acompañado de una importante carga de capacitación técnica y social. Las TIC sólo podrán ser una herramienta para el desarrollo y cubrir necesidades de la población si ésta las conoce y les da un buen uso. Para ello se ha de formar a la gente, no sólo en cómo funcionan y cómo se usan las TIC, sino también de transferir las buenas prácticas para que su uso reporte beneficios reales a la población. Debido al carácter académico de este proyecto, nuestro papel está centrado en la capacitación técnica. Por este motivo, se han desarrollado dos cursos de formación en telecomunicaciones rurales para transferir conocimientos a la población receptora de las TIC gracias a proyectos de acercamiento de las TIC a zonas rurales.

### 5.2.1. I Jornada de Telecomunicaciones Rurales de INICTEL-UNI

El Área de Tecnologías de Acceso y Radiopropagación de la Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico de INICTEL-UNI, con el auspicio del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) se organizó la ‘I Jornada de Telecomunicaciones Rurales, Investigación y Desarrollo Tecnológico para la inclusión‘.

El curso estuvo formado por diversos talleres técnicos:

- Diseño y construcción de una antena de bajo coste para acceso a Internet
- Alternativas de energía renovables para equipos de comunicación
- Redes malladas en software libre y soluciones tecnológicas para conectividad inalámbricas

Estos talleres se orientaron a la problemática rural, y estaban destinados a personal de gobiernos y universidades regionales, así como a representantes de PYMES, con el objetivo de usar los conocimientos adquiridos para aplicarlos en los diversos entornos sociales y económicos de Perú.

Los objetivos principales del evento fueron:

- Difundir los resultados de las investigaciones en relación a tecnologías de conectividad, implementándolos experimentalmente para su aplicación en entornos rurales.
- Formar una red I+D para realizar proyectos multidisciplinarios relacionados con las Telecomunicaciones Rurales, aplicados a las zonas marginales y rurales del Perú.

En el **Apéndice D.1** se incluye el manual seguido en las jornadas por los participantes. Como resultado, además de difundir el conocimiento sobre TIC rurales, se firmaron actas de acuerdo entre diversas universidades para desarrollar proyectos en esta temática, formar una red I+D rural y elaborar conjuntamente proyectos de investigación para fondos de FOCAM, Canon Minero, y otros.

- Expositores
  - Ronald Paucar Curasma
  - Mariano Chuchón Núñez
  - Marco Quispe Choquehuanca
  - Rolando Adriano Peña
  - Jorge Fernández Herrera
- Colaboradores
  - Esteban Municio Hernández
  - Javier Samaniego Marique
  - Moisés Vilcas Escobar

Número de participantes: 38



### 5.2.2. Taller de Telecomunicaciones Rurales para la FIEE

Los investigadores del Área de Tecnologías de Acceso y Radiopropagación de la Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico de INICTEL-UNI, organizaron este taller de Telecomunicaciones rurales.

El curso estuvo formado por diversos talleres técnicos:

- Diseño y construcción de una antena de bajo coste para acceso a Internet
- Alternativas de energía renovables para equipos de comunicación
- Diseño e implantación de soluciones en redes inalámbricas malladas con software libre para su aplicación en localidades aisladas

Estos talleres se orientaron a la problemática rural, y estaban destinados a alumnos de la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones y de Electrónica de la UNI.

Los objetivos principales del evento fueron:

- Difundir los resultados de las investigaciones la aplicación de las TIC en entornos rurales.
- Formar una red I+D para realizar proyectos multidisciplinarios relacionados con las Telecomunicaciones Rurales.

En el **Apéndice D.2** se incluye el manual seguido en las jornadas por los participantes. Como resultado del curso, se difundieron los temas de investigación entre los alumnos, concienciándoles e involucrándoles en temas de desarrollo rural por medio de las TIC.

- Expositores
  - Mariano Chuchón Núñez
  - Marco Quispe Choquehuanca
  - Esteban Municio Hernández
  - Rolando Adriano Peña
- Colaboradores
  - Ronald Paucar Curasma
  - Moisés Vilcas Escobar
  - Jorge Fernández Herrera

Número de participantes: 18



# Capítulo 6

## CONCLUSIONES GENERALES

Una vez realizado el estudio de las redes malladas inalámbricas, y de haber implementado una red experimental y analizado el funcionamiento de dos protocolos de encaminamiento en dicha red, podemos sacar algunas conclusiones interesantes:

- Debido al bajo coste de implementación de una red mallada inalámbrica en comparación con redes de infraestructura y punto a punto, las redes malladas inalámbricas son una muy buena herramienta para llevar las TIC a zonas rurales.
- Dichas redes deben estar diseñadas especialmente para los escenarios rurales, donde debido al aislamiento poblacional, los nodos pueden sufrir caídas frecuentes y de larga duración debido al difícil mantenimiento. Esto se traduce a que los protocolos de encaminamiento usados en estas redes han de trabajar bien con cambios de topología en la red.
- Para redes de tamaño pequeño o medio, los protocolos Batman-adv y 802.11s son los más adecuados debido a sus pocos requerimientos de recursos en los nodos, a su rápida adaptación a cambios de topología y a la interesante funcionalidad que ofrecen al trabajar en el nivel 2 OSI
- Aunque Batman-adv y 802.11s ofrecen rendimientos aceptables, cabe destacar que Batman-adv da mayores prestaciones que 802.11s en la mayoría de los casos según las pruebas realizadas, aunque en algunos escenarios concretos, como redes que necesiten alta fiabilidad y requieran ofrecer unos determinados servicios mínimos, 802.11s puede ser más conveniente.

Adicionalmente, podemos comentar algunas conclusiones relacionadas con la divulgación de las redes malladas inalámbricas:

- La creación de una distribución propia que automatice el proceso de creación de una red malla inalámbrica es muy útil para divulgar y hacer más accesible el conocimiento sobre este tipo de redes en entornos poco accesibles.
- Commotion Wireless, aunque es una distribución que consume notables recursos, tiene la ventaja de que ofrece una interfaz de uso muy intuitiva y permite crear una red mallada inalámbrica de manera sencilla y automática. Esto hace que sea una distribución muy adecuada para realizar capacitación en materia de redes malladas inalámbricas en entornos rurales.
- Es muy recomendable participar activamente en las comunidades de usuarios de las redes libres comunitarias existentes por todo el mundo, ya que son el motor principal de las redes malladas inalámbricas.

## Capítulo 7

# RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El tema de redes malladas inalámbricas rurales es un amplio campo de las redes de telecomunicación y puede dar lugar a numerosos estudios. Debido a la duración limitada de este proyecto nos hemos tenido que adaptar para generar un contenido acorde con el programa. Por este motivo, quedan todavía muchas vías de estudio sobre esta temática pendientes. Algunos de los más interesantes los resumimos a continuación:

- Realizar simulaciones virtuales de redes malladas inalámbricas para obtener conclusiones más precisas sobre la conveniencia de uno u otro protocolo de encaminamiento. A diferencia de una prueba real, la ventaja de una simulación es que se pueden realizar pruebas de manera muy sencilla y las redes pueden dimensionarse con total libertad.
- Realizar pruebas de estabilidad con los protocolos en escenarios reales. Esto permitiría obtener otras variables de interés que influyen en el comportamiento del protocolo de encaminamiento, como tiempo de respuesta ante fallos, tiempos de recuperación, paquetes perdidos, etc. . .
- Estudiar detalladamente los dos modos de funcionamiento del protocolo 802.11s, reactivo y proactivo. Sería interesante realizar un estudio detallado sobre qué modo de funcionamiento encaja mejor para redes rurales y sobre qué circunstancias.

- Comparar funcionamiento de protocolos de nivel 2 OSI con los de nivel 3 OSI. Se ha comprobado que los protocolos de encaminamiento de nivel 2 para redes malladas ofrecen nuevas funcionalidades y ventajas respecto a los de nivel 3. Sin embargo no existen estudios sobre su eficiencia respecto a los protocolos de nivel 3, ni sobre la cuantificación y explicación de esta diferente eficiencia.
- Repetir el estudio de prestaciones ofrecidas por los protocolos cuando el número de nodos de la red mallada inalámbrica sea mayor, obteniendo datos de *throughput*, *jitter* y retardo para un mayor número de saltos inalámbricos consecutivos.
- Continuar con la divulgación de redes malladas inalámbricas. En Perú el conocimiento sobre redes comunitarias libres está muy poco extendido. Este proyecto propone continuar con el trabajo de divulgación comentado en el **Capítulo 5**, seguir realizando cursos de capacitación sobre las TIC en zonas rurales, y continuar desarrollando y promoviendo el proyecto MESH-RURAL de INICTEL-UNI.
- Realizar un estudio sobre qué hardware es el más adecuado para implementar redes malladas inalámbricas en zonas rurales, así como una sistematización sobre su instalación y un conjunto de "buenas prácticas" para proteger la red de inclemencias meteorológicas, robos, etc...

# APÉNDICES





# Apéndice A

## Manuales para creación de imágenes de OpenWrt

Generalmente es posible descargarse imágenes precompiladas de OpenWRT si queremos que nuestro *router* o antena tengan funcionalidades de propósito general. Sin embargo, si queremos configurar más a fondo el *firmware* de nuestro nodo, hemos de configurar y compilar nuestra propia imagen.

En este anexo se incluye un manual para compilar *firmware* basado en OpenWRT para el equipo Ubiquiti Nanostation M5. Además de la creación de una imagen a partir del código de OpenWRT, también se proporciona información sobre cómo compilar paquetes independientes así como modificar algunos ficheros para personalizar nuestra imagen. Este manual está pensado para máquinas basadas en sistemas Unix.

También se explicará como incluir Batman-adv y 802.11s en el *firmware*. Afortunadamente, 802.11s viene incluido en el *kernel* del chip ar71xx, que lleva incluido el equipo Nanostation M5, por lo que no es necesario realizar ninguna configuración adicional para incluir 802.11s en el *firmware*. Sin embargo si que hay que realizar algunas configuraciones para poder usar Batman-adv.

## Descarga y configuración de la imagen

Para este primer paso, es necesario tener conectividad hacia Internet, ya que nos descargaremos el un conjunto de archivos desde el repositorio oficial. A este repositorio hemos de acceder mediante el software de control de versiones *Subversion*, el cual nos permitirá descargarnos el código del proyecto de OpenWRT. Antes de empezar la descarga hay que asegurarse de que tenemos instalados previamente los siguientes paquetes: gcc, binutils, patch, bzip2, flex, bison, make, gettext, pkg-config, unzip, libz-dev, lib-headers y subversion. Teniendo estos paquetes instalados, hay que realizar un checkout de OpenWRT. La versión actual Backfire es la más extendida y actualizada. Para ello escribimos:

```
svn co svn://svn.openwrt.org/openwrt/branches/backfire
cd backfire/
```

Esto nos descargará un directorio llamado backfire que contendrá una estructura de directorios que contienen el código del proyecto.

Además de compilar el kernel de OpenWRT, hemos de compilar también diversos paquetes adicionales necesarios para el funcionamiento de OpenWRT. También podemos añadir paquetes adicionales que no están incluidos en la versión simple del firmware. En nuestro caso, añadiremos el módulo de Batman-adv y la interfaz web Luci, la cual nos permitirá gestionar el nodo de manera más sencilla. Para realizar estas operaciones basta con ejecutar los siguientes comandos:

```
./scripts/feeds update
./scripts/feeds install -a -p luci
./scripts/feeds install kmod-batman-adv
```

Una vez hecho esto ya tenemos todo el código necesario para empezar a compilar. Pero antes de compilar hemos de configurar para qué *kernel* vamos a usar OpenWRT y qué paquetes de software queremos incluir en la compilación. Para ello ejecutamos el comando:

```
make menuconfig
```

Este comando nos abrirá una ventana gráfica en el terminal donde podremos navegar por diversos ítems. Lo primero es escoger el chip usado por el equipo Nanostation M5. Para ello seleccionamos *Tarjet System* y presionamos *enter* en la opción Atheros AR7xxx. Una vez hemos hecho esto, hemos de volver al menú principal y dirigirnos a Image Configuration → Kernel Modules → Network Support. Allí seleccionamos la opción *Kmod-batman-adv*. Es necesario asegurarse que la herramienta *batctl* está también activa.

Cuando hayamos hecho esto, ya se tienen los requerimientos mínimos para hacer que nuestro firmware permita al equipo Nanostation M5 actuar como nodo de redes mesh de Batman-adv y 802.11s. Sin embargo el usuario en este momento puede elegir añadir más software para compilarlo e introducirlo en la imagen. Dentro de *menuconfig* podrá encontrar todos los paquetes que necesite. Se va a añadir *Luci* a la compilación para que el usuario pueda usar la interfaz web. Para ello activamos Image Configuration → LuCi → Collections → luci.

### Edición de ficheros permanentes

Es posible que el usuario quiera cambiar los ficheros de configuración del sistema para que todos los equipos tengan una determinada configuración por defecto. Dichos ficheros hemos de introducirlos debajo del directorio *./package/base-files/files*. En este directorio nos encontramos una organización parecida a la que encontraríamos en el directorio / (raíz) del sistema de ficheros de OpenWRT funcionando en el equipo. Podemos usar cualquiera de ellos, aunque cada uno tiene una función asignada, por ejemplo: *bin*, donde se guardan los ejecutables binarios, *etc* donde se guardan los archivos de configuración del sistema, *usr*, donde se guardan los archivos de configuración del usuario, etc. . .

Por ejemplo, algunos ficheros que pueden ser interesantes modificar son */etc/rc.local* o */etc/dnsmasq.conf*. El fichero */etc/rc.local* contiene aquellos comandos que el usuario quiere ejecutar automáticamente cuando arranque el equipo. Éste puede ser un buen sitio donde podemos agregar la configuración de Barman-adv o 802.11s. En el fichero */etc/dnsmasq.conf* podemos configurar el servidor DHCP incluido en OpenWRT. Modificando en este fichero los rangos, direcciones estáticas, puertas de enlace predeterminadas, etc. . . nos aseguramos que todos las imágenes contendrán la misma configuración de DHCP por defecto. El proceso de configuración de DHCP, Batman-adv y 802.11s viene descrito en el **Apéndice B**

### Compilación

Una vez que estamos seguros de que hemos indicado mediante *menuconfig* todo el software que queremos compilar en la imagen, y hemos añadido todos los ficheros adicionales en el directorio *./package/base-files/files* procedemos a la compilación:

```
make V=99
```

Este proceso puede tomar bastante tiempo. Dependiendo del equipo donde se compile la imagen, puede tardar desde 30 minutos hasta 1 hora. Una vez que este proceso acabe, se generarán imágenes para una gran cantidad de equipos en el directorio `./bin/ar71xx`. La imagen que se usará para el Nanostation M5 es:

```
openwrt-ar71xx-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin
```

En el **Apéndice B** se detalla como hemos de transferir la imagen al equipo.

También se generan una gran cantidad de paquetes de software en el directorio `./bin/ar71xx/packages`. Estos paquetes contienen las aplicaciones que indicamos a `menuconfig` que deseábamos instalar. La mayoría están ya incluidas en la imagen, pero las aplicaciones adicionales se han de instalar manualmente. Esto se ha de realizar una vez que la imagen esté correctamente cargada en el equipo. Una vez hecho esto, desde el equipo hemos de transferir el paquete desde la computadora e instalarlo. El procedimiento para cualquiera de estos paquetes sería:

```
//para transferir
scp usuario@direccionIP:/ruta_al_paquete/nombre.ipk nombre.ipk
//para instalar
opkg install nombre.ipk
```

### Compilación e instalación de paquetes independientes

Por último, existe la opción de compilar paquetes de forma separada, sin la necesidad de volver a compilar la imagen completa. Esto generalmente es útil debido a que continuamente salen nuevas actualizaciones de las aplicaciones que se usan en OpenWRT. Esto, que puede parecer trivial a primera vista, en realidad implica que hemos de compilar el código de nuestra aplicación contra el *kernel* de la máquina en la que se vaya a usar, por lo que no es posible hacer una compilación tradicional con `gcc`. Para poder compilar una aplicación y que pueda correr sobre OpenWRT, hemos de compilar nuestro código indicando que el *kernel* destino no es el de la computadora donde se realiza la compilación. Para ello hemos de usar el sistema de directorios creado cuando compilamos una imagen de OpenWRT por primera vez. A continuación se muestra un ejemplo de como realizar este proceso. Por ejemplo, en el caso de querer modificar la implementación del protocolo Batman-adv, compilarla, y probarla en nuestro equipo.

---

El código de Batman-adv está escrito en C. Suponemos que tenemos nuestra versión del código modificado preparada en un directorio accesible para que pueda ser direccionado desde un archivo *Makefile*. El archivo *Makefile* que hemos de usar es el que se encuentra en el directorio *./feeds/packages/net/batman-adv*. Dicho fichero es el que se encarga de configurar *gcc* para que la compilación se haga contra el *kernel* que funciona sobre AR71xx (el chip de nuestro equipo Nanostation M5). Es necesario editar el fichero, cambiando las opciones del directorio fuente donde reside el código, y con ello las fases de *Clean*, *Prepare*, *Compile* e *Install*. Se muestra un ejemplo de cómo podría ser este fichero *Makefile* en el **Apéndice F**.

Una vez que tengamos preparado el *Makefile*, procedemos a compilar desde el directorio raíz del proyecto de OpenWRT con el siguiente comando:

```
make V=s package/batman-adv/{clean,prepare,compile,install}
```

Una vez que se realice la compilación, que durará en torno a unos minutos, tendremos listo en el directorio *./bin/ar71xx/packages* el paquete con nuestra versión de Batman-adv listo para instalar en el equipo según se ha detallado anteriormente.



## Apéndice B

# Manuales para la instalación y configuración de redes malladas con los protocolos de encaminamiento Batman-adv y 802.11s

A continuación se detalla información sobre la instalación de redes malladas inalámbricas que funcionen con Batman-adv y 802.11s usando nodos Ubiquiti Nanostation M5 y Ubiquiti Nanostation 5. Se trata de un manual que explica detalladamente cómo cargar el firmware a los nodos, configurar los protocolos y alguna información extra para la gestión y monitorización de la red mallada.

En el manual se trata la configuración de ambos protocolos de manera independiente, aunque la configuración de un nodo pueda permitirle trabajar con Batman-adv y 802.11s siempre que no sea de manera simultánea. En el Capítulo 5.1 se proporciona una imagen de firmware que viene cargada con ambos protocolos.





**MANUAL PARA LA INSTALACIÓN Y**  
**CONFIGURACIÓN DE REDES MALLADAS**  
**CON LOS PROTOCOLOS DE**  
**ENCAMINAMIENTO BATMAN-ADV Y 802.11S**

Esteban Municio Hernández  
Diciembre 2012

## **BATMAN-ADV**

### **FUNCIONAMIENTO DEL PROTOCOLO**

Batman-adv es una implementación de nivel 2 OSI del protocolo de encaminamiento B.A.T.M.A.N.(Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking). B.A.T.M.A.N es un protocolo de encaminamiento para redes mesh/ad-hoc inalámbricas y fue diseñado a causa de algunas de las deficiencias del protocolo OLSR, como el alto consumo de recursos.

Batman-adv hace uso de la capa de Enlace, por lo que para el usuario, la red mallada inalámbrica se comporta como un segmento de un conmutador Ethernet. Desde el punto de vista de los usuarios, cada participante posee una conexión directa, donde el protocolo esconde los detalles subyacentes (algo similar a una red mallada tunelada en nivel 2).

En B.A.T.M.A.N, ningún nodo tiene la información completa de la topología de la red ya que no es necesario. Para construir su tabla de encaminamiento, cada nodo percibe y mantiene sólo la información sobre el mejor "siguiente salto" hacia el resto de los nodos de la red. Para construir las tablas de encaminamiento, cada nodo transmite mensajes en broadcast llamados Originator Messages(OGM) para informar a los nodos vecinos sobre su existencia. Estos vecinos redifunden los OGM según algunas reglas específicas para informar a sus vecinos sobre la existencia del nodo que originalmente envió el paquete . De esta manera, la red es inundada de forma selectiva con los mensajes OGM. Los OGM son paquetes de 52 bytes y contienen la dirección del nodo que originalmente envió el paquete, la dirección del último nodo que transmitió el paquete, TTL (Time-to-live) y un número de secuencia. De esta manera, todos los nodos de la red tendrán constancia de la existencia del resto de nodos, pero no tendrán información topológica acerca de la ruta hacia ellos. Este funcionamiento se basa en la lógica de que cuanto más grande sea la red, la información sobre anchos de banda y latencia, estará menos actualizada en los nodos. Por eso se tiende a simplificar y se evita a los nodos conocer las propiedades de todos los enlaces de la red.

La métrica usada por Batman-adv es llamada TQ (Transmission Quality) y expresa la calidad del enlace del nodo hacia el destino en forma de número de paquetes recibidos. Este número de paquetes esta comprendido en una ventana deslizante, que contiene los paquetes recibidos más recientes.

Las ventajas de Batman-adv son:

- Debido a que cada nodo sólo procesa los datos hasta el nivel de enlace, consume menos recursos a la hora de procesar la información. Además, permite que nodos que no tengan dirección IP puedan participar en la red mesh. Esto lo hace atractivo para dispositivos que tienen pocos recursos.
- La capa de nivel de enlace es independiente del nivel 3, por lo que se puede trabajar con cualquier protocolo superior: IPv4, IPv6,DHCP, IPX...
- Permite roaming. Por un lado siempre tendremos conectividad con la nube a 1 salto IP desde cualquier dispositivo ajeno a la red mesh que se conecte a uno de los nodos. Por otro, un dispositivo cliente que tenga instalado batman-adv, podrá mantener su conexión con la red mesh mientras se mueve siempre que tenga a su alcance un nodo de la red.
- Encamina el flujo de datos a través de la red mesh de manera mas eficiente, ya que a los nodos no les importa la ruta completa sino el siguiente salto hacia un determinado destino.

# MONTAJE

## Nanostation M5

Lo primero que hemos de hacer es compilar la imagen. En el Anexo A viene detallado el proceso de compilación y configuración de una imagen de OpenWRT. Sin embargo también podemos usar una imagen previamente compilada. En internet existen numerosas distribuciones que ofrecen imágenes ya preparadas. La imagen de OpenWRT más común es

```
openwrt-ar71xx-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin
```

y se puede encontrar en el enlace: <http://downloads.openwrt.org/snapshots/trunk/ar71xx/>

Como se ha comentado en el Capítulo 5.1 de este proyecto se ha creado una imagen específicamente para este proyecto, que esta disponible en <http://www.inictel-uni.edu.pe/>

Una vez que tenemos el fichero imagen, hemos de instalarlo en el router. Para ello, hay que poner el equipo en modo TFTP. Esto se hace de la siguiente manera:

- Apagar la radio si es que estuviese encendida
- Presionar el botón reset de la unidad
- Encender la radio manteniendo presionado el botón reset
- Mantenga presionado el botón reset por alrededor de 20 segundos (leds parpadeando)
- Deje de presionar el botón de reset y verificar la conectividad haciendo un ping a 192.168.1.20.

Una vez que podemos comunicarnos con la dirección 192.168.1.20 de la antena, procedemos a transferir la imagen con el software TFTP, un cliente FTP simple. Para ello introducimos los siguientes comandos:

```
$$ tftp 192.168.1.20
> trace
> verbose
> bin
> put openwrt-ar71xx-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin flash_update
```

Tras unos minutos de instalación, podemos conectarnos a la antena, cuya dirección IP será ahora 192.168.1.1. Para ello usamos

```
$$ telnet 192.168.1.1
```

Para poder usar Batman-adv hemos de tener los siguientes paquetes instalados.

```
kmod-crc16_2.6.32.27-1_ar71xx.ipk
kmod-batman-adv_2.6.32.27+2012.0.0-1_ar71xx.ipk
```

Estos paquetes han de ser previamente compilados contra el *kernel* en el que se vayan a instalar. Por ese motivo, han de ser creados cuando se compile la imagen de OpenWRT, o descargar los paquetes de un repositorio.(ej: <http://downloads.openwrt.org/snapshots/trunk/ar71xx/packages/>). Una vez que tenemos los paquetes, los pasamos mediante scp desde el PC hasta la antena:

```
scp usuario@ipaddress:/path/kmod-crc16_2.6.32.27-1_ar71xx.ipk kmod-crc16_2.6.32.27-1_ar71xx.ipk
scp usuario@ipaddress:/ruta/al/archivo/kmod-batman-adv_2.6.32.27+2012.0.0-1_ar71xx.ipk kmod-batman-adv_2.6.32.27+2012.0.0-1_ar71xx.ipk
```

Y una vez que los tenemos en el equipo, instalamos los paquetes con opkg en este orden:

```
opkg install kmod-crc16_2.6.32.27-1_ar71xx.ipk
opkg install kmod-batman-adv_2.6.32.27+2012.0.0-1_ar71xx.ipk
```

Una vez hecho esto, el modulo de *kernel* Batman-adv ya está instalado. Ahora hemos de configurarlo. Para ello editamos los ficheros:

`/etc/config/network` → fichero donde se guarda la configuración de red

```
config 'interface' 'loopback'
    option 'ifname' 'lo'
    option 'proto' 'static'
    option 'ipaddr' '127.0.0.1'
    option 'netmask' '255.0.0.0'

config 'interface' 'lan'
    option 'ifname' 'eth0'
    option 'proto' 'static'
    option 'ipaddr' '192.168.1.2'
    option 'netmask' '255.255.255.0'
    option 'nat' '1'
    #option 'type' 'bridge' ← Importante desactivarlo para montar el puente mesh

//esto solo en el nodo pasarela
config 'interface' 'wan'
    option 'ifname' 'eth1'
    option 'proto' 'static'
    option 'ipaddr' '190.12.88.11'
    option 'netmask' '255.255.255.192'
    option 'gateway' '190.12.88.1'
    option 'dns' '8.8.8.8'
```

`/etc/config/wireless` → fichero donde se guarda la configuración de la interfaz inalámbrica

```
config 'wifi-device' 'radio0'
    option 'type' 'mac80211'
    option 'channel' '161'
    option 'macaddr' 'mac del nodo'
    option 'hwmode' '11n'
    option 'htmode' 'HT40+'
    list 'ht_capab' 'SHORT-GI-40'
    list 'ht_capab' 'TX-STBC'
    list 'ht_capab' 'RX-STBC'
    list 'ht_capab' 'DSSS_CCK-40'
    option 'antenna' 'vertical'
    option 'country' 'PE'
    option 'txpower' '15'

config 'wifi-iface'
    option 'device' 'radio0'
    option 'mode' 'adhoc'
    option 'ssid' 'Mesh'
    option 'swmerge' '1'
    option 'encryption' 'none'
```

/etc/rc.local → fichero que incluye los comandos que se ejecutarán al iniciar el equipo

```
wifi up
ifconfig wlan0 mtu 1528
batctl if add wlan0
ifconfig wlan0 up
#ifconfig bat0 inet 1.1.1.5 netmask 255.255.255.0
ifconfig bat0 up

brctl addbr mesh-bridge
brctl addif mesh-bridge eth0
brctl addif mesh-bridge bat0
ifconfig eth0 up
ifconfig bat0 up
ifconfig mesh-bridge inet 1.1.1.5 netmask 255.255.255.0
ifconfig mesh-bridge up
batctl vm server #solo en el nodo servidor de visualizacion
batctl gw_mode #solo en el nodo gateway

exit 0
```

El último paso sería reiniciar el equipo mediante el comando:

```
shutdown -r now
```

## **Nanostation 5**

También es posible configurar los equipos Nanostation 5 con Batman-adv de una forma muy similar. Los equipos Nanostation 5 son equipos menos potentes y sin puerto WAN. Sólo trabajan con el estándar 802.11a, lo que hace que ofrezcan menos throughput. Hay que tener en cuenta que el chip de la Nanostation 5 es *atheros*, por lo que hemos de trabajar con imágenes y paquetes distintos.

La imagen de OpenWRT más común para Nanostation 5 es:

```
openwrt-atheros-ubnt5-squashfs.bin
```

y se puede encontrar en el enlace: <http://downloads.openwrt.org/snapshots/trunk/atheros/>

Una vez que tenemos el fichero imagen, hemos de instalarlo en el router. Para ello, hay que poner el equipo en modo TFTP. Esto se hace de la siguiente manera:

- Apagar la radio si es que estuviese encendida
- Presionar el botón reset de la unidad
- Encender la radio manteniendo presionado el botón reset
- Mantenga presionado el botón reset por alrededor de 20 segundos (leds parpadeando)
- Deje de presionar el botón de reset y verificar la conectividad haciendo un ping a 192.168.1.20.

Una vez que podemos comunicarnos con la dirección 192.168.1.20 de la antena, procedemos a transferir la imagen con el software TFTP, un cliente FTP simple. Para ello introducimos los siguientes comandos:

```
$$ ftp 192.168.1.20
> trace
> verbose
> bin
> put openwrt-atheros-ubnt5-squashfs.bin flash_update
```

Tras unos minutos de instalación, podemos conectarnos a la antena, cuya dirección IP será ahora 192.168.1.1. Para ello usamos

```
$$ telnet 192.168.1.1
```

Para poder usar Batman-adv hemos de tener los siguientes paquetes instalados.

```
kmod-lib-crc16_3.3.8-1_atheros.ipk
kmod-batman-adv_3.3.8+2012.4.0-2_atheros.ipk
```

Estos paquetes han de ser previamente compilados contra el *kernel* en el que se vayan a instalar. Por ese motivo, han de ser creados cuando se compile la imagen de OpenWRT, o descargar los paquetes de un repositorio.(ej: <http://downloads.openwrt.org/snapshots/trunk/atheros/packages/>). Una vez que tenemos los paquetes, los pasamos mediante scp desde el PC hasta la antena:

```
scp usuario@ipaddress:/path/kmod-lib-crc16_3.3.8-1_atheros.ipk kmod-lib-crc16_3.3.8-1_atheros.ipk
```

```
scp usuario@ipaddress:/ruta/al/archivo/kmod-batman-adv_3.3.8+2012.4.0-2_atheros.ipk kmod-batman-adv_3.3.8+2012.4.0-2_atheros.ipk
```

Y una vez que los tenemos en el equipo, instalamos los paquetes con opkg en este orden:

```
opkg install kmod-lib-crc16_3.3.8-1_atheros.ipk
opkg install kmod-batman-adv_3.3.8+2012.4.0-2_atheros.ipk
```

Una vez hecho esto, el modulo de *kernel* Batman-adv ya está instalado. Ahora hemos de configurarlo. Para ello editamos los ficheros:

`/etc/config/network` → fichero donde se guarda la configuración de red

```
# Copyright (C) 2006 OpenWrt.org

config interface loopback
    option ifname lo
    option proto static
    option ipaddr 127.0.0.1
    option netmask 255.0.0.0

config interface lan
    option ifname eth0
    #option type bridge ← Importante desactivarlo para montar el puente mesh
    option proto static
    option ipaddr 192.168.1.1
    option netmask 255.255.255.0
    #option gateway 192.168.1.1
    #option dns 8.8.8.8
```

`/etc/config/wireless` → fichero donde se guarda la configuración de la interfaz inalámbrica

```
config 'wifi-device' 'radio0'
    option 'type' 'mac80211'
    option 'channel' '161'
    option 'macaddr' 'mac de nodo'
    option 'hwmode' '11a'
    #option 'htmode' 'HT40+'
    #list 'ht_capab' 'SHORT-GI-40'
    #list 'ht_capab' 'TX-STBC'
    #list 'ht_capab' 'RX-STBC'
    #list 'ht_capab' 'DSSS_CCK-40'
    option 'antenna' 'vertical'
    option 'country' 'PE'
    option 'txpower' '15'

config 'wifi-iface'
    option 'device' 'radio0'
    option 'mode' 'adhoc'
    option 'ssid' 'Mesh'
    option 'swmerge' '1'
    option 'encryption' 'none'
```

`/etc/rc.local` → fichero que incluye los comandos que se ejecutarán al iniciar el equipo

```
# Put your custom commands here that should be executed once
# the system init finished. By default this file does nothing.
wifi up
ifconfig wlan mtu 1528
batctl if add wlan0
ifconfig wlan0 up
ifconfig bat0 inet 1.1.1.5 netmask 255.255.255.0
ifconfig bat0 up
batctl gw_mode client
```

Apagamos y encendemos y el nodo queda operativo para la red mesh.

# CONFIGURACIONES

## **Optimización multienlace:**

Si tenemos un nodo con muchos enlaces locales estables y todos con la misma TQ, batman-adv puede ser configurado para que use todo esos enlaces en forma de *round robin* para aumentar el *throughput*. Esto se puede hacer con

```
batctl bonding enable
```

Para enlaces con las mismas velocidades a lo largo del tiempo, se puede incrementar el ancho de banda hasta un 50%. Por defecto, esta opción viene deshabilitada.

## **Fragmentación:**

Batman-adv añade una cabecera extra al nivel 2, lo que puede provocar que las interfaces ethernet y wlan, típicamente con una MTU de 1500, puedan descartar el paquete. Para evitar esto, batman-adv automáticamente fragmenta y desfragmenta los paquetes que sobrepasen este límite.

Además existía una limitación en el número de clientes conectados a un nodo debido al tamaño fijo de los paquetes de anuncio. Los clientes que excedan ese límite no serán anunciados. Este problema está solucionado gracias al mecanismo de fragmentación de los paquetes TT\_Response.

Por defecto la fragmentación esta activada a partir de la versión 2010.2.0, por lo que en nuestro caso también lo estará. Sin embargo para desactivar esta opción usamos el comando:

```
batctl f 1
```

## **Aislamiento:**

Comúnmente en los puntos de acceso Wifi podemos “aislar” el equipo para que no puedan conectarse los clientes entre sí a través del punto de acceso. En muchas ocasiones esto está considerado como una medida de seguridad. Con las redes mesh podemos hacer lo mismo. Para que un nodo impida la conexión entre los clientes de su interfaces puenteadas hemos de añadir

```
echo enabled > /sys/class/net/bat0/mesh/ap_isolation
```

ya que generalmente está deshabilitado por defecto. También existe un comando de batctl que facilita el proceso:

```
batctl ap 1
```



## **Agregación**

Desde la versión 2012.0.0, batman-adv puede reducir la sobrecarga del protocolo creada para encontrar a todos los participantes de la red. Para ello, tiene la habilidad de recolectar y agregar estos mensajes (los OGM) en uno solo, en lugar de enviar muchos de pequeño tamaño. Esta opción viene habilitada por defecto por su gran utilidad. Aún así, en redes mesh con gran movilidad (por ejemplo coches) sería mejor desactivar la agregación para aumentar la capacidad de respuesta ante a cambios de enlace a cambio de reducir un poco el ancho de banda disponible. Para desactivarlo:

```
echo disabled > /sys/class/net/bat0/mesh/aggregated_ogms
```

También existe un comando de batctl que facilita el proceso:

```
batctl ag 1
```

## **Intervalo de Originadores**

Se puede especificar el intervalo en el cual batman-adv inunda la red con información de control. El valor por defecto es 1 mensaje por segundo para permitir a los nodos percibir cambios rápidamente (1000 ms). En ambientes muy estáticos (nodos fijos, calidad del enlace estable, nodos conectados permanentemente...) se puede incrementar el valor del intervalo para conseguir más ancho de banda. Por otro lado, podría ser interesante reducir el intervalo de envío de información de control en redes con gran movilidad y enlace poco estables, incrementando notablemente el tráfico de control, pero obteniendo mejores prestaciones globalmente.

Para cambiar el valor a un intervalo de 6 segundos:

```
echo "6000" /sys/class/net/bat0/mesh/orig_interval
```

también existe un comando de batctl que facilita el proceso:

```
batctl it 6000
```

## **Visualización**

Batman-adv posee una herramienta propia para la visualizar la topología de la red.

Se obtiene automáticamente al tratar con el software graphviz (fdp) la salida del comando *batctl vd*, que genera la topología de la red mesh. Para esto, se ha de establecer un nodo como servidor. Para ello es necesario ejecutar en dicho nodo el comando:

```
batctl vm server
```

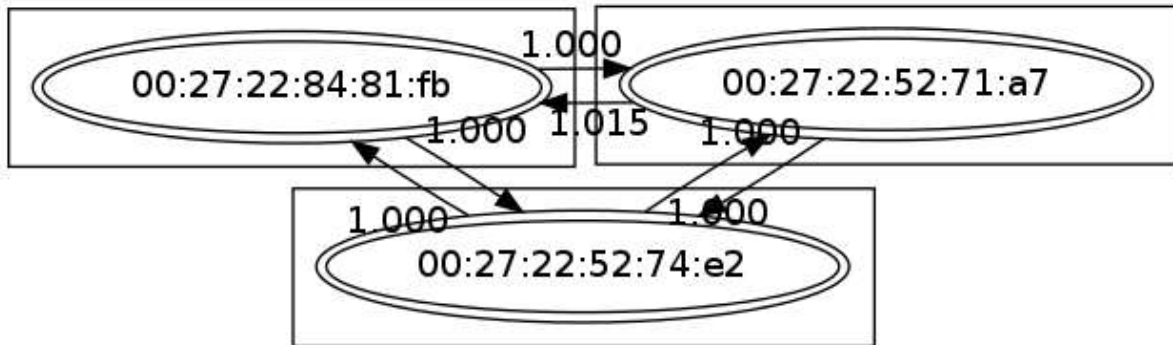
Un ejemplo de uso sería ejecutar el siguiente comando en el nodo servidor:

```
batctl vd -n -T > archivo
```

y posteriormente procesar el fichero:

```
cat archivo | fdp -Tpng > mapa_mesh.png
```

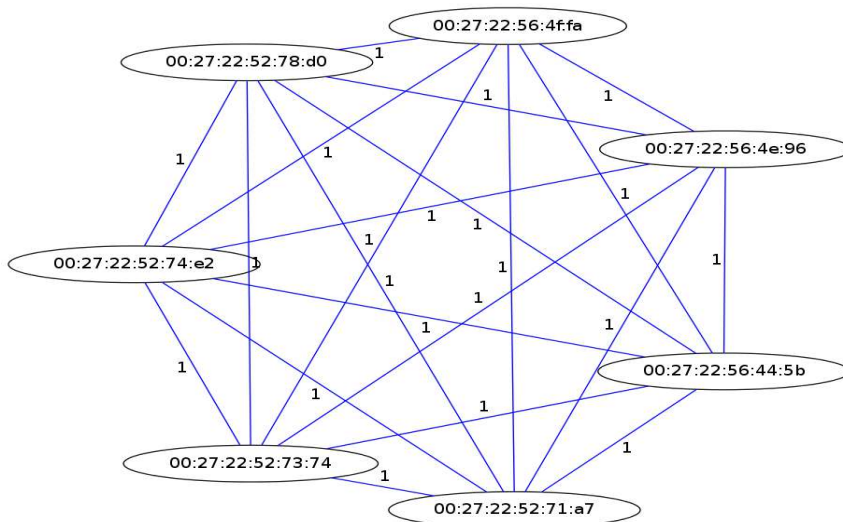
Se crearía una imagen similar a esta.



Existen muchas posibilidades para generar distintos estilos de imágenes mediante el comando fdp. Existe mas información en:

<http://www.open-mesh.org/projects/batman-adv/wiki/VisAdv>

Cabe mencionar que en el proyecto se ha creado un *script* llamado *topology.sh* para visualizar la topología de la red, sin depender de un servidor de Batman-adv que recoja la información de la topología. Esto tiene la ventaja de que podemos visualizar la topología de cualquier red mallada inalámbrica independientemente del protocolo de encaminamiento usado. El *script* se detalla en el **Apéndice F**, y su funciona conectándose remotamente a los distintos nodos y obteniendo la información sobre sus vecinos. El resultado aproximado de este *script* se muestra en la siguiente figura:



## Configuración DHCP

Si queremos que los clientes se conecten a la red mesh mediante DHCP, hemos de configurar un servidor DHCP en uno de los nodos. Para hacerlo modificamos el fichero `/etc/dnsmasq.conf` y añadimos:

```
# filter what we send upstream
domain-needed
bogus-priv
filterwin2k

# allow /etc/hosts and dhcp lookups via *.lan
local=/lan/
#domain=houwels.sgnnet.wafreenet

# enable dhcp (start,end,netmask,leasetime)
dhcp-authoritative
# dhcp range for LAN ports - 10.60.68.16/29 = 10.60.68.17-10.60.68.22
dhcp-range=vlan0,1.1.1.50,1.1.1.249,255.255.255.0,48h

#dhcp range for WAN port - 192.168.1.0/24
#dhcp-range=vlan1,192.168.1.2,192.168.1.10,255.255.255.0,5m

# dhcp lease file donde se guardan las ip asignadas
dhcp-leasefile=/tmp/dhcp.leases

# use /etc/ethers for static hosts; same format as --dhcp-host
# <hwaddr> [<hostname>] <ipaddr>
#read-ethers

# default gateway and dns for LAN ports
dhcp-option=vlan0,3,1.1.1.1 # asignamos gw
dhcp-option=vlan0,6,8.8.8.8 #asignamos ip del servidor dns
```

Hay que elegir una asignación adecuada de direcciones IP para evitar posibles direcciones IP duplicadas. Adicionalmente, hemos de modificar el fichero `/etc/init.d/dnsmasq` y cambiar su contenido a:

```
#!/bin/sh
/usr/sbin/dnsmasq
```

Se recomienda hacer una copia del fichero antes de modificarlo por si es necesario en un futuro. Una vez modificado `/etc/init.d/dnsmasq`, reiniciamos el proceso:

```
killall dnsmasq
/etc/init.d/dnsmasq
```

Por último, hemos de habilitar que las peticiones DHCP se propaguen por la red mallada inalámbrica hasta el nodo servidor DHCP. Para esto, hemos de ejecutar en dicho nodo servidor el siguiente comando:

```
batctl gw_mode server
```

Y en los nodos clientes ejecutar:

```
batctl gw_mode client
```

## **Configuración de gateway para salida a internet**

Para el caso del nodo gateway, hemos de activar el port-forwarding para dar conectividad a la red mesh hacia internet. El nodo gateway será aquel que esté conectado hacia una red exterior por medio de su puerto WAN. Para dar salida a la red mallada hacia otra red externa hemos de agregar una regla de enmascaramiento en el firewall del nodo gateway, ya que su direccionamiento es privado:

```
/sbin/iptables -t nat -A POSTROUTING -o <wan interface> -j MASQUERADE
```

donde <wan interface> es eth1, en caso de las Nanostation M5.

Las reglas han de ser añadidas permanentemente al firewall. Una opción para realizar esto es añadir el comando anterior al fichero /etc/rc.local.

## **Monitorización:**

Como sabemos, en batman-adv, cada nodo tiene guardado la mejor ruta hacia cada nodo de la red. Para obtener esta información hacemos uso del comando:

```
batctl o
```

```
root@OpenWrt:~# batctl o
[B.A.T.M.A.N. adv 2012.3.0, MainIF/MAC: wlan0/00:27:22:56:44:5b (bat0)]
  Originator   last-seen (#/255)   Nexthop [outgoingIF]:   Potential nexthops ...
00:27:22:52:74:e2   0.500s   (243) 00:27:22:56:4e:96 [ wlan0]: 00:27:22:56:4e:96 (243) 00:27:22:52:74:e2
00:27:22:56:4e:96   0.050s   (254) 00:27:22:56:4e:96 [ wlan0]: 00:27:22:52:74:e2 (225) 00:27:22:56:4e:96
```

donde aparecerán para cada entrada, la dirección MAC del destino y el tiempo que ha pasado desde que se recibió el último paquete (OMG) suyo, la dirección MAC del siguiente salto, la métrica (255 máxima calidad), posibles siguientes saltos elegidos en caso de que el actual quede inactivo, etc...

Para obtener el nivel de señal que se recibe de cada vecino (además de otros parámetros útiles), vamos a usar el comando

```
iw wlan0 station dump
```

Los datos más importantes que arroja este comando son:

*inactive time*: si este parámetro es muy grande, significa que esta entrada ya no existe (hace mucho que se recibió un paquete de ese nodo)

*signal avg*: es la potencia de señal recibida promediada. Nos servirá para montar correctamente los enlaces entre los nodos

*tx/rx bitrate*: es la velocidad de transmisión de subida y de bajada hacia ese vecino. Esta velocidad viene determinada por el MCS que se use en cada momento.

```
root@OpenWrt:~# iw wlan0 station dump
Station 00:27:22:56:4e:96 (on wlan0)
  inactive time:      460 ms
  rx bytes: 1210797
  rx packets: 16666
  tx bytes: 654803
  tx packets: 708
  tx retries: 121
  tx failed: 1
  signal: -46 [-53, -48] dBm
  signal avg: -47 [-53, -48] dBm
  tx bitrate: 216.0 MBit/s MCS 13 40Mhz
  rx bitrate: 6.0 MBit/s
  authorized: yes
  authenticated: yes
  preamble: long
  WMM/WME: yes
  MFP: no
  TDLS peer: no
```

También existen algunas herramientas proporcionadas por *batctl* que nos servirán a monitorizar la red mallada a nivel de enlace con herramientas típicas de el nivel IP. Algunos de estos comandos son:

```
batctl p <dir MAC del nodo>
```

Para hacer ping a un nodo destino

```
batctl tr <dir MAC del nodo>
```

Para realizar un traceroute de nivel 2 hacia un nodo destino

```
batctl td <interfaz batman-adv>
```

Por último tenemos una herramienta útil para solucionar problemas. Se trata de el registro de mensajes del protocolo (*log*). Para ello existe el comando:

```
batctl l
```

Este comando generará continuamente mensajes según ciertos eventos. Existen 4 niveles de mensajes, el nivel 0, el cual no muestra ningún mensaje, el nivel 1, donde muestra todos los mensajes correspondientes al encaminamiento, el nivel 2, que muestra los mensajes correspondientes al encaminamiento y los mensajes HNA, y el nivel 3 que muestra todos los mensajes. Para habilitar uno y otro se usa el siguiente comando:

Nivel0

```
batctl ll none
```

Nivel1

```
batctl ll routes
```

Nivel2

```
batctl ll batman
```

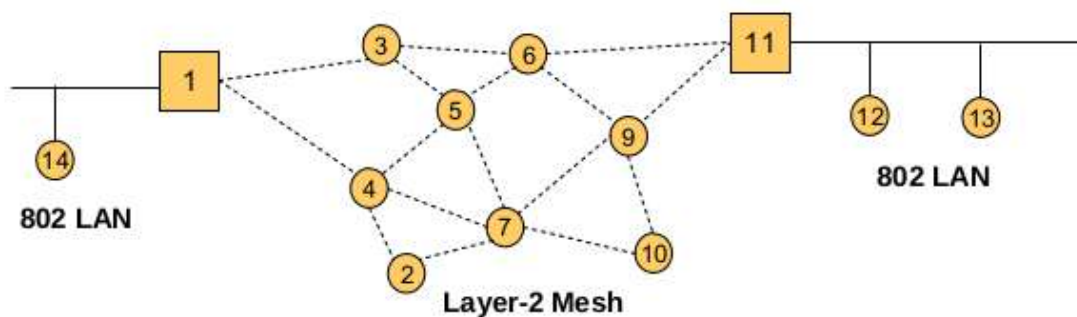
Nivel3

```
batctl ll tt
```

## IEEE 802.11 s

### FUNCIONAMIENTO DEL PROTOCOLO

El estándar IEEE 802.11s es el estándar de comunicaciones mallas para redes inalámbricas 802.11. 802.11s es una solución basada en el nivel 2 OSI que provee de capacidades de encaminamiento a las redes mallas inalámbricas. Esto hace que una red 802.11s se comporte como un solo segmento Ethernet de cara a otras redes. Esto hace que la red sea transparente para tramas unicast, multicast y broadcast de dentro y fuera de la red mallada.



El protocolo por defecto que usa 802.11s es HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol). Combina la flexibilidad del descubrimiento de ruta bajo demanda (ej: AODV) con la eficiencia de un encaminamiento proactivo (ej: OLSR). La combinación de ambos hace que HWMP sea adecuado para una gran variedad de dispositivos y redes. Sin embargo el framework permite usar otros protocolos de encaminamiento.

Existen principalmente 4 tipos de paquetes:

Root Announcement – Da información a los nodos sobre la presencia y distancia de un nodo raíz

Route Request – Pregunta a otros MP la ruta hacia un determinado originador

Route Rply – Envía la ruta solicitada hacia un originador. Puede ser enviado por el nodo destino o por cualquier otro nodo que conozca la ruta.

Route Error – Se informa que un originador no puede ser alcanzado por una cierta ruta.

HWMP tiene dos modos de funcionamiento:

Basado en RM-AODV: Posee las características de AODV (RFC 3561) y posee extensiones para identificar la mejor ruta con menor métrica, añadiendo funcionalidades de descubrimientos de destinos bajo demanda. Permite nodos móviles y evita que los nodos mantenga rutas hacia destinos que ya no están activos o alcanzables. Para limitar la inundación de mensajes por toda la red se usa el mecanismo Expanding Ring Search. Las rutas “de vuelta” son establecidas por los mensajes Route Request que envían los originadores en broadcast y las “de ida” son establecidas por los mensajes Route Reply enviados como respuesta a los Route Request.

En este modo de funcionamiento, los nodos monitorizan el estado de los enlaces de las rutas activas. Cuando un enlace de una ruta activa se cae, se envía un mensaje Router Error a los demás nodos en unicast. Para evitar bucles, todos los nodos mantienen un número de secuencia de destino que garantiza una ruta fiable hacia el nodo.

Basado en árbol de encaminamiento: Se puede designar un nodo raíz (*root*) que construye y mantiene un árbol de encaminamiento. Obtiene mejores resultados si la red es jerárquica. Este modo evita inundar la red con mensajes para descubrir rutas y nodos.

El nodo raíz puede emitir mensajes Route Request en broadcast para conocer las rutas hacia los destinos y mensajes Root Announcements para informar de su presencia a los demás nodos. Los MP seleccionan su nodo raíz basándose en el camino con menor métrica.

Para seleccionar las mejores rutas, la métrica usada por defecto está basada en el “Airtime”, pero también se da soporte a otras métricas que consideren el balanceo de carga, el consumo, etc...

La métrica “Airtime” tiene en cuenta los aspectos radio del enlace y esta diseñada para medir la cantidad de recursos del canal consumidos cuando las tramas son transmitidas a través del enlace inalámbrico. A diferencia de ETX (Expected Transmission count), que sólo cuenta la tasa de pérdida de tramas, Airtime tiene en cuenta tanto la tasa de pérdida de tramas como el ancho de banda del enlace. Esto también lo hace la métrica ETT (Expected Transmission Time), sin embargo, Airtime también tiene en cuenta la sobrecarga del canal de acceso y de protocolo. El coste de esta métrica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_a = \left[ O + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{pt}}$$

Donde  $O$  es la constante que cuantifica la sobrecarga del canal de acceso y del protocolo de nivel de enlace,  $B$  es la longitud de la trama de prueba en bits,  $r$  es la tasa de transmisión en Mbps y  $e$  es la tasa de pérdida de las tramas de prueba. Los MP monitorizan y prueban continuamente sus enlaces para mantener la métrica actualizada con el actual estado de la red.

# MONTAJE

## Nanostation M5

Lo primero que hemos de hacer es compilar la imagen contra el driver de la Nanostation M5. En el Apéndice A viene detallado el proceso de compilación y configuración de una imagen de OpenWRT. Sin embargo también podemos usar una imagen previamente compilada. En Internet existen numerosas distribuciones que ofrecen imágenes ya preparadas. La imagen de OpenWRT más común es

```
openwrt-ar71xx-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin
```

y se puede encontrar en el enlace: <http://downloads.openwrt.org/snapshots/trunk/ar71xx/>

Como se ha comentado en el Capítulo 5.1, se ha creado una imagen específica para este proyecto, que esta disponible en <http://www.inictel-uni.edu.pe/>

Una vez que tenemos el fichero imagen, hemos de instalarlo en el router. Para ello, hay que poner el equipo en modo TFTP. Esto se hace de la siguiente manera:

- Apagar la radio si es que estuviese encendida
- Presionar el botón reset de la unidad
- Encender la radio manteniendo presionado el botón reset
- Mantenga presionado el botón reset por alrededor de 20 segundos (leds parpadeando)
- Deje de presionar el botón de reset y verificar la conectividad haciendo un ping a 192.168.1.20.

Una vez que podemos comunicarnos con la dirección 192.168.1.20 de la antena, procedemos a transferir la imagen con el software TFTP, un cliente FTP simple. Para ello introducimos los siguientes comandos:

```
$$ tftp 192.168.1.20
> trace
> verbose
> bin
> put openwrt-atheros-ubnt5-squashfs.bin flash_update
```

Tras unos minutos de instalación, podemos conectarnos a la antena, cuya dirección IP será ahora 192.168.1.1. Para ello usamos

```
$$ telnet 192.168.1.1
```

El modulo de *kernel* 802.11s ya viene incluido en las versiones de *kernel* más modernas, por lo tanto no es necesario agregarlo manualmente.

Para que las NanostationM5 sean compatibles entre sí, o incluso con otros equipos que trabajen con 802.11s por ejemplo, las Nanostation 5 o el OLPC-XO1, hemos de asegurarnos que ambos tienen la misma versión del driver compat-wireless instalada. Para comprobar la versión instalada usamos el siguiente comando:

```
root@OpenWrt:~# cat /sys/module/compat/parameters/compat_version
```



Cuyo resultado debería ser similar a:

```
compat-wireless-2012-07-13
```

Para configurar el módulo de forma que opere en nuestra red mesh editamos los ficheros:

`/etc/config/network` → fichero donde se guarda la configuración de red

```
config 'interface' 'loopback'
    option 'ifname' 'lo'
    option 'proto' 'static'
    option 'ipaddr' '127.0.0.1'
    option 'netmask' '255.0.0.0'

config 'interface' 'lan'
    option 'ifname' 'eth0'
    option 'proto' 'static'
    option 'ipaddr' '192.168.1.2'
    option 'netmask' '255.255.255.0'
    option 'nat' '1'
    #option 'type' 'bridge' ← Importante desactivarlo para montar el puente mesh

//esto solo en el nodo pasarela
config 'interface' 'wan'
    option 'ifname' 'eth1'
    option 'proto' 'static'
    option 'ipaddr' '190.12.88.11'
    option 'netmask' '255.255.255.192'
    option 'gateway' '190.12.88.1'
    option 'dns' '8.8.8.8'
```

`/etc/config/wireless` → fichero donde se guarda la configuración de la interfaz inalámbrica

```
config 'wifi-device' 'radio0'
    option 'type' 'mac80211'
    option 'channel' '161'
    option 'macaddr' 'mac del nodo'
    option 'hwmode' '11n'
    option 'htmode' 'HT40+'
    list 'ht_capab' 'SHORT-GI-40'
    list 'ht_capab' 'TX-STBC'
    list 'ht_capab' 'RX-STBC'
    list 'ht_capab' 'DSSS_CCK-40'
    option 'antenna' 'vertical'
    option 'country' 'PE'
    option 'txpower' '15'

config 'wifi-iface'
    option 'device' 'radio0'
    option 'network' 'lan'
    option 'mode' 'ap'
    option 'ssid' 'Mesh'
    option 'encryption' 'none'
```

/etc/rc.local → fichero que incluye los comandos que se ejecutarán al iniciar el equipo

```
# Put your custom commands here that should be executed once
# the system init finished. By default this file does nothing
ifconfig wlan0 down
iw dev wlan0 interface add meshif type mp
ifconfig meshif up
brctl addbr br0mesh
brctl stp br0mesh off
brctl addif br0mesh eth0
brctl addif br0mesh meshif
ifconfig eth0 down
ifconfig meshif down
ifconfig eth0 0.0.0.0 up
ifconfig meshif 0.0.0.0 up
ifconfig br0mesh inet 1.1.1.5 netmask 255.255.255.0
ifconfig br0mesh up
iw dev meshif mesh join netmesh
iw dev meshif set channel 161 HT40+

exit 0
```

Para que los cambios surjan efecto, hemos de reiniciar el nodo. Podemos hacerlo mediante el comando:

```
$$ shutdown -r now
```

## **Nanostation 5**

También es posible configurar los equipos Nanostation 5 con 802.11s de una forma muy similar. Los equipos Nanostation 5 son equipos menos potentes y sin puerto WAN. Sólo trabajan con el estándar 802.11a, lo que hace que ofrezcan menos throughput. Hay que tener en cuenta que el chip de la Nanostation 5 es *atheros*, por lo que hemos de trabajar con imágenes y paquetes distintos.

La imagen de OpenWRT más común para Nanostation 5 es:

```
openwrt-atheros-ubnt5-squashfs.bin
```

y se puede encontrar en el enlace: <http://downloads.openwrt.org/snapshots/trunk/atheros/>

Una vez que tenemos el fichero imagen, hemos de instalarlo en el router. Para ello, hay que poner el equipo en modo TFTP. Esto se hace de la siguiente manera:

- Apagar la radio si es que estuviese encendida
- Presionar el botón reset de la unidad
- Encender la radio manteniendo presionado el botón reset
- Mantenga presionado el botón reset por alrededor de 20 segundos (leds parpadeando)
- Deje de presionar el botón de reset y verificar la conectividad haciendo un ping a 192.168.1.20.

Una vez que podemos comunicarnos con la dirección 192.168.1.20 de la antena, procedemos a transferir la imagen con el software TFTP, un cliente FTP simple. Para ello introducimos los siguientes comandos:

```
$$ tftp 192.168.1.20
> trace
> verbose
> bin
> put openwrt-atheros-ubnt5-squashfs.bin flash_update
```

Tras unos minutos de instalación, podemos conectarnos a la antena, cuya dirección IP será ahora 192.168.1.1. Para ello usamos

```
$$ telnet 192.168.1.1
```

El módulo de *kernel* 802.11s ya viene incluido en las versiones de *kernel* más modernas, por lo tanto no es necesario agregarlo manualmente.

Para que las NanostationM5 sean compatibles entre sí, o incluso con otros equipos que trabajen con 802.11s por ejemplo, las Nanostation 5 o el OLPC-XO1, hemos de asegurarnos que ambos tienen la misma versión del driver compat-wireless instalada. Para comprobar la versión instalada usamos el siguiente comando:

```
root@OpenWrt:~# cat /sys/module/compat/parameters/compat_version
```

Cuyo resultado debería ser similar a:

```
compat-wireless-2012-07-13
```

Al igual que para la Nanostation M5, hemos de modificar los siguientes ficheros:

`/etc/config/network` → fichero donde se guarda la configuración de red

```
# Copyright (C) 2006 OpenWrt.org

config interface loopback
    option ifname lo
    option proto static
    option ipaddr 127.0.0.1
    option netmask 255.0.0.0

config interface lan
    option ifname eth0
    #option type bridge ← Importante desactivarlo para montar el puente mesh
    option proto static
    option ipaddr 192.168.1.1
    option netmask 255.255.255.0
```

`/etc/config/wireless` → fichero donde se guarda la configuración de la interfaz inalámbrica

```
config wifi-device radio0
    option type mac80211
    option channel 161
    option macaddr 00:27:22:84:81:fb
    option hwmode 11a
    option antenna vertical
    option country PE
    option txpower 15
    option htmode HT40

config wifi-iface
    option device radio0
    option network lan
    option mode ap
    option ssid OpenWrt
    option encryption none
```

`/etc/rc.local` → fichero que incluye los comandos que se ejecutarán al iniciar el equipo

```
ifconfig wlan0 down
iw dev wlan0 interface add meshif type mp
ifconfig meshif up
iw dev meshif mesh join netmesh
brctl addbr br0mesh
brctl stp br0mesh off
brctl addif br0mesh eth0
brctl addif br0mesh meshif
ifconfig eth0 down
ifconfig meshif down
ifconfig eth0 0.0.0.0 up
ifconfig meshif 0.0.0.0 up
ifconfig br0mesh inet 1.1.1.5 netmask 255.255.255.0
ifconfig br0mesh up
iw dev meshif set channel 161
iw dev meshif mesh join netmesh

exit 0
```

# CONFIGURACION DEL PROTOCOLO

## Modo proactivo – Modo reactivo

Por defecto, 802.11s funciona en el modo basado en RM-AODV, es decir, el encaminamiento se hace bajo demanda. Si queremos que se use un nodo como *root* para que funcione en modo árbol de encaminamiento, hemos de ejecutar los siguientes comandos en el nodo elegido como *root*:

```
iw mesh set mesh_param mesh_hwmp_rootmode=1
iw mesh set mesh_param mesh_gate_announcements=1
```

Una vez echo esto, los nodos establecerán proactivamente los caminos hacia el nodo *root*, ya que dicho nodo está ahora anunciando su presencia. Se recomienda tener pocos nodos *root* en una red ya que la gestión proactiva introduce tráfico de control adicional en la red.

## Parámetros físicos

Una de las características de 802.11s es que tiene una mejor comunicación con el nivel físico. Esto puede ser una ventaja, pero también lo hace dependiente a que el nivel físico sea del tipo 802.11. Algunos parámetros específicos del nivel físico se pueden configurar en el siguiente directorio:

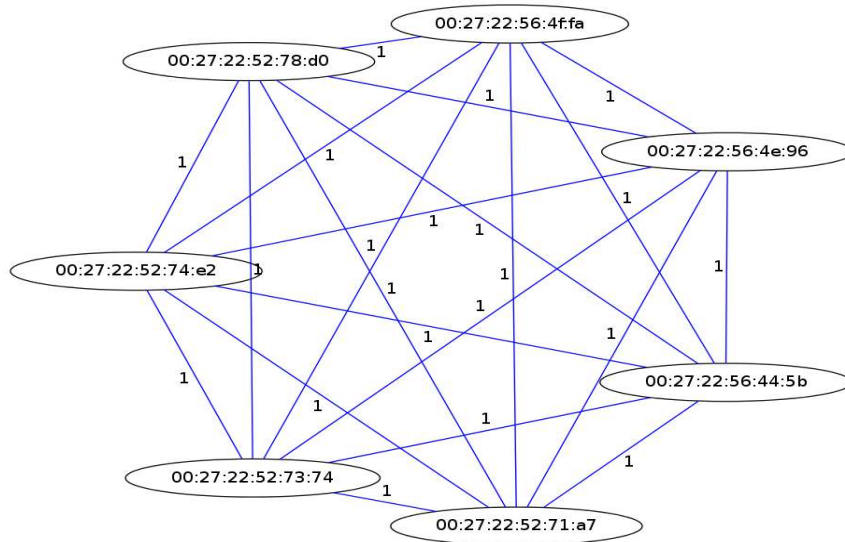
```
/sys/kernel/debug/ieee80211/phy0/netdev\:meshif/

root@OpenWrt:~# cat /sys/kernel/debug/ieee80211/phy0/netdev\:meshif/
channel_type      mesh_stats/      rc_rateidx_mcs_mask_5ghz
drop_unencrypted  rc_rateidx_mask_2ghz  state
flags            rc_rateidx_mask_5ghz  stations/
mesh_config/     rc_rateidx_mcs_mask_2ghz  tsf
```

Para modificar los parámetros basta con editar los valores de los ficheros. Dentro del directorio */stations* se podrán ver los parámetros físicos de los otros nodos.

## Visualización

No existe aún una herramienta propia de 802.11s para visualizar la topología de la red. Por este motivo se ha creado un *script* en shell llamado *topology.sh* para visualizar la topología. Para ello, el *script* se conecta remotamente a los distintos nodos y obtiene la información sobre sus vecinos. El *scripts* se detalla en el **Apéndice F**. El resultado aproximado de este *script* se muestra en la siguiente figura:



## Configuración DHCP

Si queremos que los clientes se conecten a la red mesh mediante DHCP, hemos de configurar en el nodo *root* el servidor DHCP en cada nodo con acceso a clientes. Para hacerlo modificamos el fichero `/etc/dnsmasq.conf` y añadimos:

```
# filter what we send upstream
domain-needed
bogus-priv
filterwin2k

# allow /etc/hosts and dhcp lookups via *.lan
local=/lan/
#domain=houwels.sgnet.wafreenet

# enable dhcp (start,end,netmask,leasetime)
dhcp-authoritative
# dhcp range for LAN ports - 10.60.68.16/29 = 10.60.68.17-10.60.68.22
dhcp-range=vlan0,1.1.1.50,1.1.1.249,255.255.255.0,48h

#dhcp range for WAN port - 192.168.1.0/24
#dhcp-range=vlan1,192.168.1.2,192.168.1.10,255.255.255.0,5m

# dhcp lease file donde se guardan las ip asignadas
dhcp-leasefile=/tmp/dhcp.leases

# use /etc/ethers for static hosts; same format as --dhcp-host
# <hwaddr> [<hostname>] <ipaddr>
#read-ethers

# default gateway and dns for LAN ports
dhcp-option=vlan0,3,1.1.1.1 # asignamos gw
dhcp-option=vlan0,6,8.8.8.8 #asignamos ip del servidor dns
```

Adicionalmente, hemos de modificar el fichero `/etc/init.d/dnsmasq` y cambiar su contenido a:

```
#!/bin/sh
/usr/sbin/dnsmasq
```

Se recomienda hacer una copia del fichero antes de modificarlo por si es necesario en un futuro. Una vez modificado `/etc/init.d/dnsmasq`, reiniciamos el proceso:

```
killall dnsmasq
/etc/init.d/dnsmasq
```

Si trabajamos en modo de funcionamiento reactivo, hemos de configurar un servidor DHCP en cada nodo de la red que tenga acceso a clientes. Para ello hemos de repetir el proceso anterior, pero eligiendo cuidadosamente una asignación adecuada de direcciones IP en cada nodo, para evitar posibles direcciones IP duplicadas. Para ello basta con asignar rangos distintos en cada nodo (por ejemplo 20 o 30 direcciones por nodo). Para que podamos conectarnos desde todos los nodos, hemos de realizar esta operación en todos ellos.

Se recomienda desconectar el servidor `dnsmasq` en aquellos nodos que no se vayan a usar como punto de acceso para reducir el consumo de energía.

## **Monitorización**

Para ver el estado de las rutas usamos el comando:

```
iw meshif mpath dump
```

Cuyo resultado es:

```
root@OpenWrt:~# iw meshif mpath dump
DEST ADDR      NEXT HOP      IFACE      SN      METRIC  QLEN      EXPTIMEDTIM  DRET  FLAGS
00:27:22:52:78:d0 00:27:22:56:44:5b meshif      196     317     0         1360     200     1     0x5
00:27:22:56:44:5b 00:27:22:56:44:5b meshif      39      106     0         1360     100     0     0x15
```

Las tablas poseen los campos de `DEST ADDR`, la dirección a un determinado destino, `NEXT HOP`, el siguiente salto establecido para ese destino, `IFACE`, la interfaz de salida hacia ese destino, `SN`, el número de secuencia del último paquete PREQ recibido y `METRIC`, la métrica basada en Airtime que usa 802.11s. Esta métrica es la acumulación de la métrica de cada enlace hasta un determinado destino. También se indica `QLEN`, el número de tramas pendientes de procesar para una determinada ruta, `EXPTIME`, el tiempo dentro del cual la ruta expirará, `DTIM`, el tiempo que queda para que una ruta quede establecida, `DRET`, el número de intentos de descubrimiento desde otros nodos por una determinada ruta, y `FLAGS`, una máscara de bits consistente en los siguientes estados para una determinada ruta:

```
MESH_PATH_ACTIVE = BIT(0),
MESH_PATH_RESOLVING = BIT(1),
MESH_PATH_DSN_VALID = BIT(2),
MESH_PATH_FIXED = BIT(3),
MESH_PATH_RESOLVED = BIT(4),
```





## Apéndice C

# Artículo técnico. Comparación de protocolos

En este anexo se incluye el artículo técnico "*Evaluación experimental de los protocolos de encaminamiento IEEE 802.11s y Batman-Adv en una red mallada inalámbrica aplicada en un entorno rural*". Dicho artículo se pretende presentar y publicar en el simposium de telecomunicaciones URSI (Unión Científica Internacional de Radio) de 2013 en España.

# Evaluación experimental de los protocolos de encaminamiento IEEE 802.11s y Batman-Adv en una red mallada inalámbrica aplicada en un entorno rural

Esteban Municio\*, Marco Quispe†, Ronald Paucar†, Mariano Chuchón†, Daniel Díaz†

\*ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, España  
e.municio@alumnos.upm.es

†Área de Tecnologías de Acceso y Radiopropagación, INICTEL-UNI, Perú  
mquispe, rpaucar, mchuchon, ddiaz@inictel-uni.edu.pe

**Resumen**—La implementación de sistemas de comunicación inalámbricos en zonas rurales mediante el despliegue de redes de datos en modo infraestructura es inadecuada debido a su alto coste y su estructura centralizada no tolerante a fallos. Las topologías malladas permiten superar tales limitaciones, mejorando el área de cobertura y minimizando el coste, y sacrificando para ello throughput. Por ello, en el presente trabajo se propone el uso de dicho tipo de tecnologías para mitigar la brecha digital existente en las zonas alejadas del Perú. Es así que se realiza la evaluación de las prestaciones que los protocolos de encaminamiento IEEE 802.11s y Batman-Adv ofrecen sobre una red mallada inalámbrica experimental implementada en la comunidad Lachocc, en la región de Huancavelica del Perú, ubicada a 4700 msnm. El estudio de carácter comparativo se realizó en base a parámetros de calidad de servicio tales como ancho de banda, retardo y variación de retardo. Se determinó que ambos protocolos ofrecen un buen rendimiento sin embargo, de acuerdo a las pruebas realizadas, en la mayoría de los casos Batman-adv brinda ligeramente mejores prestaciones.

## I. INTRODUCCIÓN

Generalmente, las mejoras producidas por el avance de las TIC no se transfieren a la población mundial de igual manera, generando el crecimiento de la brecha digital. Dicha diferencia es mayor en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo debido a que en ellas existe una problemática inherente a la hora de desplegar las TICs pues generalmente son áreas de difícil acceso en las cuales la población se encuentra muy dispersa, lo que origina que la mayoría de los proyectos de despliegue de infraestructuras resulten económicamente inviables. En países desarrollados el estado generalmente se hace cargo de estos proyectos no rentables sin embargo en los países en vías de desarrollo no se realiza esta tarea o se realiza parcialmente. Por ello, una alternativa efectiva en costos de operación y mantenimiento es utilizar tecnologías de redes malladas inalámbricas debido a que, gracias a su filosofía descentralizada, se aprovechan mejor los recursos de la red y se cubren grandes áreas de cobertura, logrando una alta resistencia a caídas de enlaces y cambios de topología gracias a la gran cantidad de enlaces redundantes presentes en ella lo que las convierte en redes robustas y fiables.

Las redes malladas inalámbricas son cada vez más usadas en entornos rurales como lo demuestran los proyectos Village Telco[1] o RedesLibres[2].

Como el funcionamiento de una red multisalto depende en gran medida del protocolo de encaminamiento utilizado, este trabajo se centra en comparar el rendimiento de una red mallada inalámbrica experimental en base a la implementación de dos de ellos con enfoque de software libre: IEEE 802.11s [3] y Batman-Adv [4]. Para ello se desplegó una red de dicho tipo en un escenario alto andino de la sierra Peruana, en la región Huancavelica

## II. PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO PARA REDES MALLADAS

Los protocolos de encaminamiento IEEE 802.11s y Batman-Adv son implementaciones a nivel 2 con respecto al modelo de referencia OSI, lo que los diferencia de otros protocolos de nivel 3 como OLSR [5]. A continuación éstos son descritos.

### II-A. Batman-adv

B.A.T.M.A.N Advanced (Batman-adv) es una implementación de nivel 2 OSI del protocolo de encaminamiento B.A.T.M.A.N (Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking) [6]. B.A.T.M.A.N es un protocolo de encaminamiento para redes mesh/ad-hoc inalámbricas multisalto y cuyo diseño fue motivado a causa de algunas deficiencias del protocolo OLSR, como el alto consumo de recursos de red. Las primeras implementaciones de B.A.T.M.A.N operan en la capa 3 del modelo OSI (batmand) [7], sin embargo, Batman-adv actúa como un solo segmento de nivel de enlace compartido por todos los clientes.

En Batman, no es necesario que los nodos tengan la información completa de la topología de la red y del estado de sus enlaces. En su lugar, reciben y mantienen sólo la información correspondiente al mejor "siguiente salto" hacia el resto de los nodos de la red. Para construir las tablas de encaminamiento, cada nodo transmite mensajes en broadcast llamados Originator Messages (OGM), de esa manera informan a los nodos vecinos sobre su existencia.

Éstos a su vez difunden los OGM según algunas reglas específicas para informar a sus vecinos sobre la existencia del nodo que originalmente envió el paquete. De esta manera, la red es inundada de forma selectiva con los mensajes OGM, paquetes de 52 bytes que contienen la dirección del nodo que originalmente envió el paquete, la dirección del último nodo que transmitió el paquete, TTL(Time-to-live) y un número de secuencia. De esta manera, todos los nodos de la red tendrán constancia de la existencia del resto de nodos, pero no tendrán información topológica acerca de la ruta hacia ellos, ni de la calidad que tienen los enlaces por separado. Para saber cuál es el mejor enlace hacia un nodo, se hace uso de una ventana deslizante para almacenar los números de secuencia recibidos de cada destino. El número de secuencia permite diferenciar información nueva y obsoleta. La ventana deslizante tiene un tamaño máximo de 255 y la cantidad de números de secuencia (paquetes recibidos no repetidos) en la ventana se usa como métrica para determinar la calidad de las rutas hacia el resto de nodos de la red. Esta métrica recibe el nombre de TQ (Transmission Quality).

### II-B. IEEE 802.11s

El estándar IEEE 802.11s fue definido para establecer topologías malladas en redes IEEE 802.11. Es una solución de nivel 2 OSI que provee de capacidades de encaminamiento a dichas redes. El protocolo que usa por defecto se denomina HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol). El protocolo HWMP contempla 2 modos de funcionamiento: basado en encaminamiento reactivo (modo por demanda) y basado en encaminamiento proactivo (modo Root). Esta forma de trabajo hace que HWMP posea el bajo consumo del descubrimiento de ruta bajo demanda y la eficiencia de un encaminamiento proactivo.

En el enfoque reactivo o por demanda está basado en el protocolo RM-AODV, mientras que el enfoque proactivo se basa en la construcción de un árbol de encaminamiento, donde el nodo Root posee la información sobre la topología de la red. Esta flexibilidad ofrecida por HWMP hace que IEEE 802.11s sea adecuado para una gran variedad de dispositivos y redes.

La métrica considerada por defecto se denomina Airtime Link Metric (ALM), aunque también soporta a otras que consideran, por ejemplo, la QoS o el balanceo de carga. ALM está diseñado para estimar la cantidad de recursos del canal consumidos cuando las tramas son transmitidas, tomando como parámetros la tasa de pérdidas de paquetes y el ancho de banda del enlace inalámbrico. Una de las ventajas que posee IEEE 802.11s, es que además de poseer las características de cualquier protocolo de encaminamiento de nivel 2 OSI, permite definir de una manera más precisa aspectos de seguridad y el acceso al medio. Esta estrecha relación con el nivel físico, hace que, a diferencia de Batman-adv, que trabaja con cualquier tipo de red, 802.11s sólo pueda trabajar con redes wireless del tipo LAN 802.11. Actualmente existen pocas implementaciones 802.11s debido a que se trata de un estándar recientemente publicado en Julio de 2012. La implementación más importante y extendida es open80211s [8].

## III. IMPLEMENTACIÓN

### III-A. Escenario

La red mallada inalámbrica experimental se ha desplegado en la comunidad rural Lachocc, ubicada en la región Huancavelica, en el Perú, la cual se encuentra ubicada a una altura de 4700 msnm y cuenta con una población promedio de 100 habitantes. Allí también se encuentra el Centro de Investigación y Desarrollo de Camélidos Sudamericanos (CIDCS) de la Universidad Nacional de Huancavelica (UNH). El CIDCS cuenta con siete pequeñas casas correspondientes a los pastores encargados del cuidado de los camélidos, los cuales se encuentran distribuidos en el área correspondiente a la comunidad. La interconexión de cuatro de estas casas (denominadas casa2, casa3, casa4 y casa5) se realizó a través de una red mallada inalámbrica experimental en la cual se hizo uso de los protocolos de encaminamiento IEEE 802.11s (HWMP en modo proactivo) y Batman-Adv. Se ha escogido el modo proactivo de HWMP debido a que es el que más diferencias aporta respecto a Batman-adv. En la Figura 1 se muestra la topología de la red implementada así como las distancias entre los nodos.

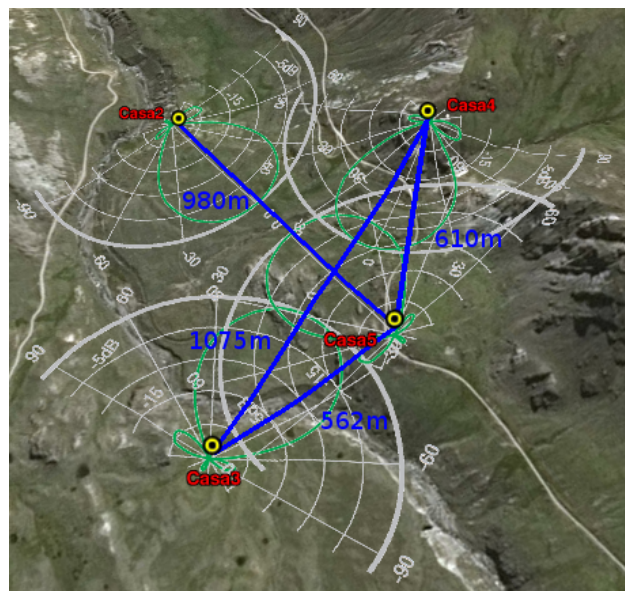


Figura 1: Topología de la red mallada inalámbrica experimental

En la Tabla I se muestran las coordenadas de la ubicación de los nodos.

Cuadro I: Datos de la ubicación de las antenas

-	Longitud	Latitud	Apuntamiento
Casa2	-75 °6'4.20"	-12 °51' 30.0"	170.5 °
Casa3	-75 °6.17' 17.5"	-12 °52' 1.9"	62.6 °
Casa4	-75 °5.45 '45.6"	-12 °51.45' 90.0"	242.7 °
Casa5	-75 °5' 59.0"	-12 °52' 1.0"	350.5 °

### III-B. Detalles de implementación

1) *Hardware:* Se utilizaron los equipos Nanostation M5 (NS M5) de la marca Ubiquiti Networks, los cuales operan bajo el estándar IEEE 802.11n a una frecuencia de 5.8 GHz (canal 161). Se han configurado para trabajar con una potencia de 15dbm y con un ancho de canal de 40Mhz (HT40+). A estos equipos se ha conectado una computadora, por lo que también actúan como puntos de acceso. Las computadoras poseen puertos Fastethernet y fueron conectadas a las antenas por cables UTP Categoría 5 de 30 metros de longitud. Las antenas fueron colocadas a una altura de 4 metros respecto al suelo. Para estas posiciones, los niveles de potencia recibida para cada antena se muestran en la Tabla II

Cuadro II: Potencias recibidas de cada antena

-	Casa2	Casa3	Casa4	Casa5
Casa2	X	*	*	-68dBm
Casa3	*	X	-59dBm	-74dBm
Casa4	*	-63dBm	X	-68dBm
Casa5	-69dBm	-75dBm	-69dBm	X

En pruebas realizadas en laboratorio, en condiciones de propagación muy favorables, estos equipos presentan una tasa binaria (throughput) promedio de 93.6 Mbps en un solo salto para ambas soluciones de encaminamiento.

2) *Software:* Para usar los equipos NS M5 como nodos de redes inalámbricas malladas, se ha compilado una versión de OpenWRT (firmware basado en GNU/Linux) con los módulos de IEEE 802.11s y de Batman-Adv. El archivo generado se ha utilizado para actualizar el firmware de los equipos inalámbricos utilizados en las pruebas. El driver usado para 802.11s ha sido *compat-wireless-2012-07-13* y la versión de Batman-adv usada ha sido la *2012.0.0-1*. Para poder conectar los equipos NS M5 con las computadoras, se ha usado la utilidad *brctl* para realizar un *bridge* (interfaz puente) entre la interfaz ethernet y la interfaz mesh inalámbrica de la antena [9].

## IV. RESULTADOS

Los datos recolectados durante la evaluación realizada fueron procesados y son presentados en las Figuras 2, 3 y 4, las cuales corresponden a la dependencia de los parámetros de retardo medio acumulado, throughput máximo y variación media de retardo (*jitter*) respectivamente con respecto al número de saltos.

En la Figura 2 se observa que el retardo medio es, en todos los casos, ligeramente menor en Batman-Adv que en IEEE 802.11s, aunque esta diferencia es mínima para 4 y 5 saltos.

En la Figura 3 se observa la variación drástica del throughput con respecto al número de saltos. Así mismo, al igual que en el caso del retardo, se verifica que se obtienen mejores prestaciones con Batman-Adv que con IEEE 802.11s.

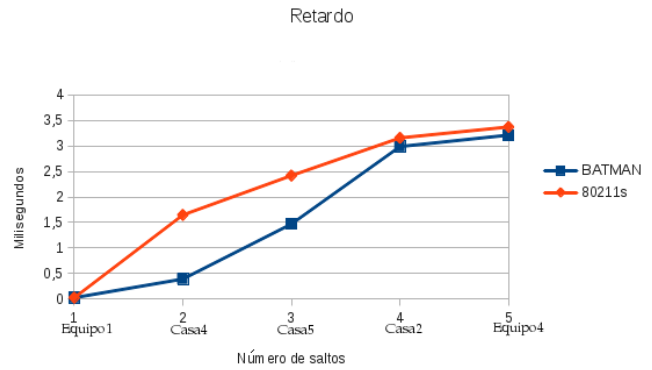


Figura 2: Acumulación de retardo por número de saltos

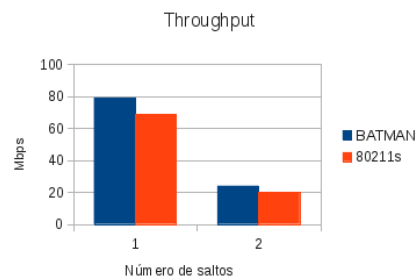


Figura 3: Variación del throughput máximo según el número de saltos

En la Figura 4 se observa que la variación media del retardo ofrecida por la red es creciente con el número de saltos para ambos protocolos como cabría esperar en una red de paquetes. Otra vez más se verifica que Batman-Adv ofrece ligeramente mejores prestaciones.

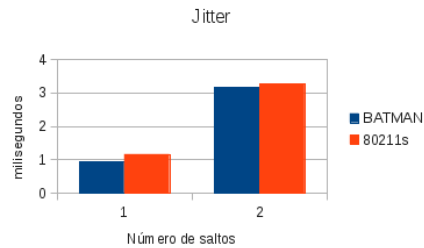


Figura 4: Variación del jitter promedio según el número de saltos

De acuerdo a los resultados obtenidos de la red mallada experimental Batman-Adv ofrece mejores prestaciones que IEEE 802.11s. En [10] se indica que una de las hipótesis que puede justificar este comportamiento es que la métrica considerada por IEEE 802.11s es muy influenciada por la velocidad de transmisión del enlace, la cual depende principalmente del parámetro MCS (Índice de Modulación y Codificación, definido por el estándar IEEE 802.11n)

cuyo valor cambia de forma automática de acuerdo a las variaciones en el nivel medio de la potencia recibida una vez que la señal pasa por el canal inalámbrico. Esta variabilidad de la métrica de IEEE 802.11s puede provocar inestabilidad en la ruta, lo cual hace que el rendimiento de la red, calculada en base a los valores de retardo, throughput y variación de retardo, disminuya.

Debido a que IEEE 802.11s calcula su métrica más rápidamente [10], es más adecuado en redes inalámbricas que presentan tasas altas de desvanecimiento ya que los cambios de ruta no implicarán grandes problemas en la calidad de la conexión. Con Batman-Adv la métrica, al basarse en la recepción de paquetes OGM del resto de los nodos, es más estable, y por lo tanto el rendimiento es mejor en canales inalámbricos con poco desvanecimiento como el considerado. En caso de caída de un nodo, Batman-adv se vería afectado en mayor medida que IEEE 802.11s debido a que su métrica no varía tan rápidamente como 802.11s.

## V. CONCLUSIONES

Como se ha comprobado, las redes malladas inalámbricas rurales pueden llegar a ofrecer altas prestaciones usando soluciones de encaminamiento de nivel 2. Aunque tanto Batman-Adv como IEEE 802.11s ofrecen un buen rendimiento, cabe destacar que Batman-Adv, en general y en la red evaluada, se comporta de una mejor forma. En escenarios en los que se requiera alta fiabilidad, IEEE 802.11s puede ser más conveniente. Se puede considerar que el uso de ambos protocolos para implementar redes malladas inalámbricas en zonas rurales es adecuado, eligiendo uno u otro de acuerdo al entorno de propagación en el que el enlace es establecido.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en los laboratorios del Área de Tecnologías de Acceso y Radiopropagación del INICTEL-UNI con apoyo de la Universidad Politécnica de Madrid por lo que agradecemos a las autoridades y compañeros de ambas instituciones por todo el apoyo prestado.

## REFERENCIAS

- [1] Village Telco (2011) [villagetelco.org](http://villagetelco.org) [Online] Acceso: Dic 2012 <http://villagetelco.org>
- [2] Proyecto RedesLibres Latinoamérica - Altermesh (2012, Sep) [redeslibres.altermundi.net](http://redeslibres.altermundi.net) [Online] Acceso: Dic 2012 <http://redeslibres.altermundi.net>
- [3] IEEE 802.11s Task Group, *IEEE P802.11s/D10.01. Draft STANDARD for Information Technology. Telecommunications and information exchange between systems.*, Amendment 10: Mesh Networking IEEE 802.11s Draft 10.01 Abril de 2011.
- [4] C. Aichele, M. Lindner, S. Wunderlich A. Neumann *IETF Work In Progress Internet-Draft Better approach to mobile ad-hoc networking (batman)*, 2008 <http://tools.ietf.org/html/draft-openmesh-b-a-t-m-a-n-00> Acceso: Dic 2012
- [5] Venkat Mohan Sarabu *Routing Protocols for Wireless Mesh Networks*, IJSER (2011, Aug) <http://www.ijser.org/viewPaperDetail.aspx?AUG1109> Acceso: Dic 2012
- [6] C. Aichele, M. Lindner, A. Neumann *B.A.T.M.A.N Status Report*, 2007 <http://downloads.open-mesh.org/batman/papers/batman-status.pdf> Acceso: Dic 2012
- [7] E. Chissungu, E. Blake, Hanh Le, *Investigation into BATMANd-0.3.2 Protocol Performance in an Indoor Mesh Potato Testbed*, Cape Town, South Africa: University of Cape Town.
- [8] Albert Batiste Troyano, *Protocolos de encaminamiento en redes inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental*, Sevilla, España: Universidad de Sevilla, 2011.
- [9] Wakisa Kaula, *Building Easily Deployable Mesh Networks for First Respondents Based on 802.11n Access Points*, Athens, Greece: Athens Information Technology, 2011.
- [10] Rosario G. Garroppo, Stefano Giordano, Luca Tavanti, *Experimental evaluation of two open source solutions for wireless mesh routing at layer two*, Pisa, Italy: Università di Pisa.



# Apéndice D

## Manuales de capacitación en telecomunicaciones rurales

### D.1. Manual I Jornada de Telecomunicaciones Rurales INICTEL-UNI



Figura D.1: *Pruebas de campo en INICTEL-UNI con los participantes de la I Jornada de Telecomunicaciones rurales*







# I Jornada de Telecomunicaciones Rurales Inictel-Uni

## GUÍAS DE LABORATORIO

### **Talleres**

- ✓ *Construcción de una antena de banda ancha para acceso a redes inalámbricas en zonas aisladas*
- ✓ *Energías renovables para el desarrollo de las comunicaciones rurales*
- ✓ *Diseño e implantación de soluciones en redes inalámbricas malladas con software libre aplicadas en localidades aisladas*

San Borja, 12 y 16 de octubre del 2012





---

## LABORATORIO N° 1

---

**TEMA:** Construcción de una antena de banda ancha para acceso a redes inalámbricas en zonas aisladas.

**OBJETIVOS:**

- Diseño y construcción de una antena casera
- Pruebas de parámetros de transmisión de la antena

**EQUIPOS Y MATERIALES:**

- Laptop con adaptador USB inalámbrico o PC con tarjeta de red inalámbrica.
- Conector tipo N hembra para chasis.
- 3mts de cable RG58 (50 Ohm) conector Tipo N macho a SMA hembra.
- Una lata de 8 a 9cm de Diámetro y 14 a 15cm de longitud.
- 10cm de alambre de cobre 2mm diámetro (12 AWG).
- Un caudín con estaño.

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO:

### Antena

Es un dispositivo (conductor metálico) diseñado con el objetivo de emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa.



### Impedancia de entrada

Tiene una componente resistiva y una reactiva; la impedancia de entrada es igual a la suma de la resistencia de radiación más la resistencia de pérdida. La impedancia de una antena de comunicaciones es de 50 OHM.

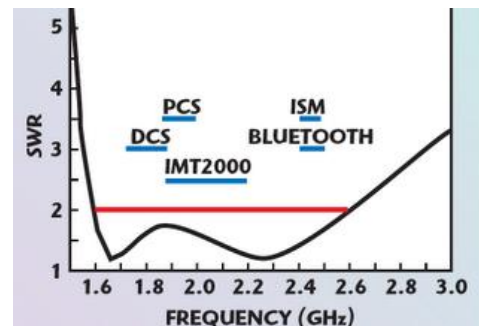
### Relación de Onda Estacionaria (ROE o SWR)

Para tener una buena transmisión de potencia entre el transmisor y la antena, es necesario que la impedancia del transmisor sea el conjugado complejo de la impedancia de la antena.

ROE: medida de desadaptación entre la impedancia del transmisor y de la antena.

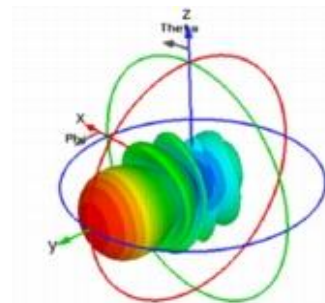
A mayor ROE, es peor la adaptación.

ROE = 1 establece una adaptación perfecta.



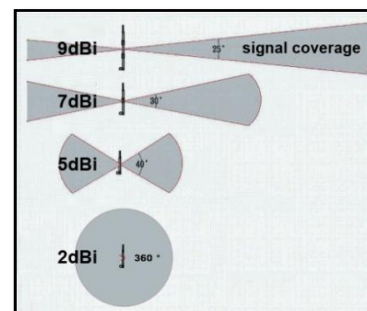
### Directividad

Es la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección particular. Para un enlace inalámbrico que utiliza antenas fijas en ambos extremos, se puede utilizar esta directividad para concentrar la radiación en la dirección deseada.



### Ganancia

Se define como la concentración de potencia en la dirección de máxima radiación. La Ganancia se produce por el efecto de la directividad al concentrarse la potencia en las zonas indicadas en el diagrama de radiación.



### Decibelios

El **decibel**, símbolo **dB**, es la unidad relativa empleada en telecomunicaciones para expresar la relación entre dos magnitudes: la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia.

- **dBW**: La W indica que el decibelio hace referencia a vatios. Es decir, se toma como referencia 1 W (vatio). Así, a un vatio le corresponden 0 dBW.
- **dBm**: Cuando el valor expresado en vatios es muy pequeño, se usa el milivatio (mW). Así, a un mW le corresponden 0 dBm.

La ganancia de un dispositivo, expresada en decibelios viene dada por la fórmula:

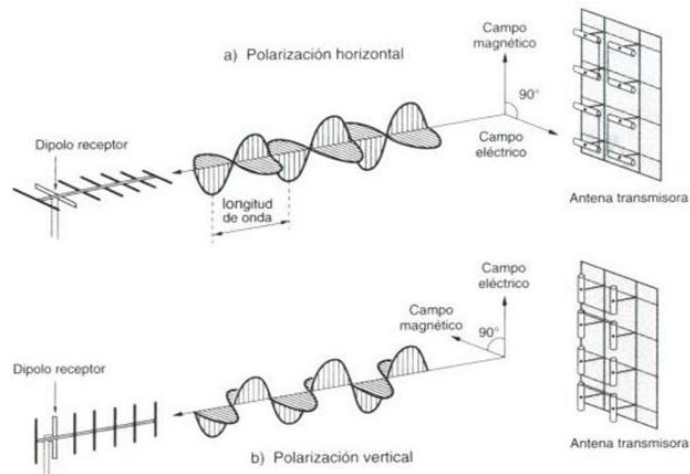
$$dB = 10 \times \log_{10} \frac{P_S}{P_E}$$

$P_E$  es la potencia de la señal en la entrada del dispositivo  
 $P_S$  la potencia a la salida del mismo.

### Polarización

Es la orientación de las ondas electromagnéticas al salir de la antena. Hay dos tipos básicos de polarización que aplican a las antenas, como son: Lineal (incluye vertical, horizontal y oblicua) y circular (que incluye circular derecha, circular izquierda, elíptica derecha, y elíptica izquierda), según el sentido de giro del campo (observado alejándose desde la antena).

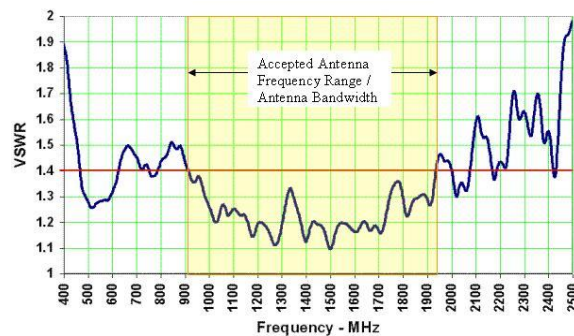
La antena transmisora debe de tener la misma polaridad de la antena receptora para máximo rendimiento



### Ancho de banda

Es el margen de frecuencias en el cual los parámetros de la antena cumplen unas determinadas características.

Es el intervalo de frecuencias en la cual debe funcionar satisfactoriamente la antena.



### Patrón de Radiación

Es la representación gráfica de la forma en que la energía electromagnética de una antena se distribuye en el espacio, en función de la dirección (coordenadas en horizontal y vertical).

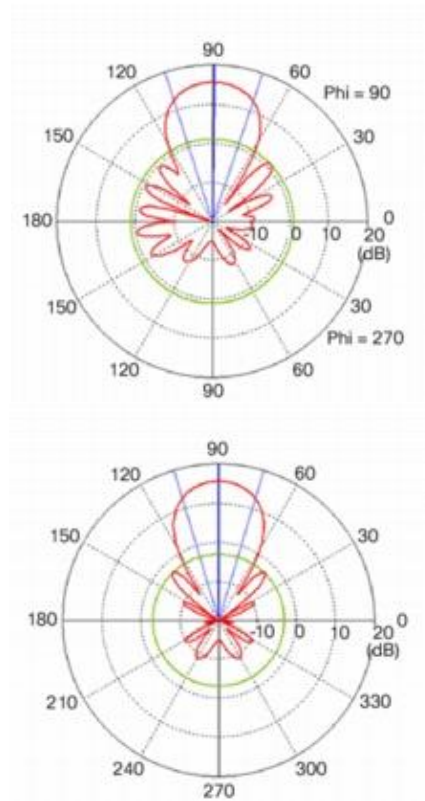
Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son:

**Dirección de apuntamiento:** Es la de máxima radiación.

**Lóbulo principal:** Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.

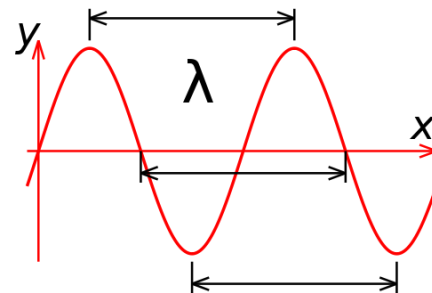
**Lóbulos secundarios:** Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.

El patrón de vertical es una gráfica de la energía radiada por la antena vista de perfil. El patrón de horizontal es una gráfica de la energía radiada vista directamente desde arriba. Al combinar ambas gráficas se tiene una representación tridimensional de como es realmente radiada la energía desde la antena.



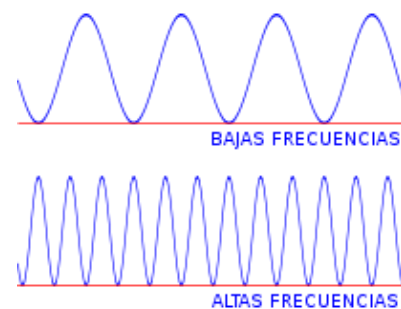
### Lambda (Longitud de onda, $\lambda$ )

Es el período espacial o la distancia que hay de pulso a pulso. Normalmente se consideran 2 puntos consecutivos que poseen la misma fase: 2 máximos, 2 mínimos, 2 cruces por cero.



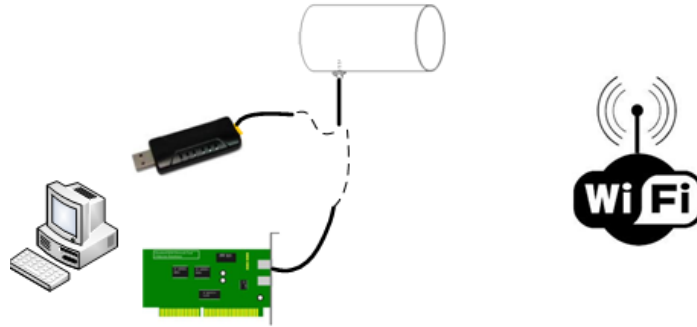
### Frecuencia

Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. La frecuencia ( $f$ ) de una onda es el número de oscilaciones por segundo y se mide en hercios (Hz).

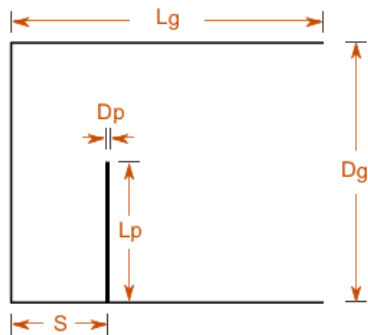


**2. PARTE PRÁCTICA:**

Se implementará el siguiente escenario



Las medidas de la antena circular de guía de onda serán:



- Dg: Diámetro de lata
- Lg: longitud de la lata
- Lp: longitud del Radiador
- S: Distancia del radiador
- Dp: Diámetro de Radiador

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\text{frecuencia}}$$

Frecuencia = \_\_\_\_\_ MHz

$\lambda$  = \_\_\_\_\_ metros

---

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\left\{ 1 - \left( \frac{\lambda}{1.706 D_g} \right)^2 \right\}^{0.5}}$$

Dg = \_\_\_\_\_ metros

$\lambda_g$  = \_\_\_\_\_ metros

---

$$S = \frac{\lambda_g}{4}$$

S = \_\_\_\_\_ metros

---

---

$$L_g = \frac{3}{4} \lambda_g$$

$$L_g = \text{_____ metros}$$

---

---

$$L_p = \frac{\lambda}{4}$$

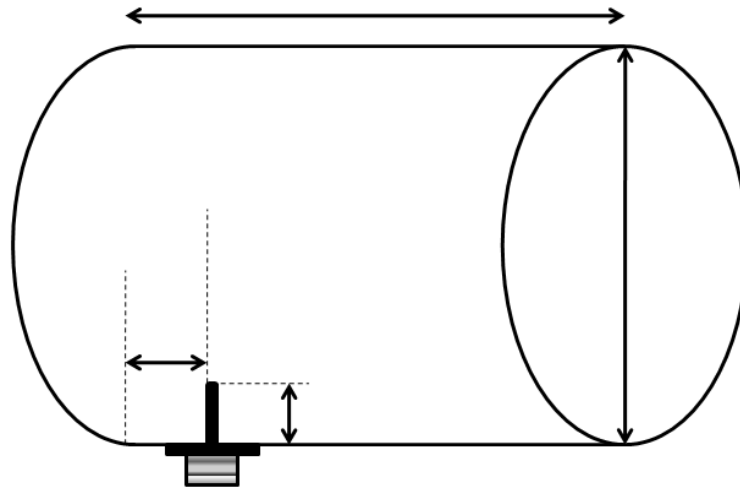
$$L_p = \text{_____ metros}$$

---

---

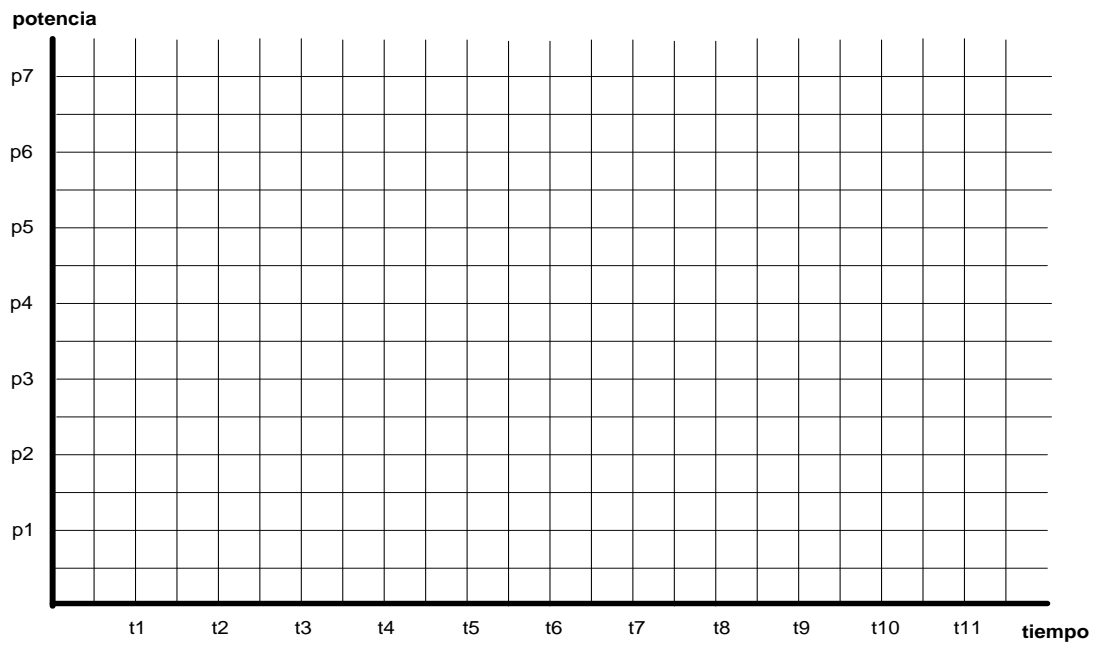
$$D_p = 2 \text{ mm}$$

Colocar las medidas de su antena



Dibujar la señal recibida por la antena







---

## LABORATORIO N° 2

---

**TEMA:** Instalación de un sistema fotovoltaico autónomo para comunicaciones inalámbricas rurales.

---

### OBJETIVOS:

---

- Identificación de las partes y componentes de un sistema fotovoltaico autónomo.
- Identificación de los parámetros intensidad de corriente y voltaje del panel fotovoltaico.
- Instalación de un sistema fotovoltaico para comunicaciones.
- Dimensionado de un sistema fotovoltaico para comunicaciones.

---

### EQUIPOS Y MATERIALES:

---

- Guía de laboratorio.
- 1 Panel fotovoltaico 85W.
- 1 batería solar de 100hA.
- 1 inversor de 180 W.
- 1 controlador de carga de 15 A.
- 2 multímetros Fluke.
- 1 llave térmica.
- 1 Brújula.
- 1 Transportador.
- 1 Nivel.
- 1 Radio de banda ancha.

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO:

### 1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son de baja potencia (menores a 10 kWp) que se instalan en lugares aislados donde no existe una red eléctrica. Un sistema fotovoltaico autónomo cuenta básicamente con cuatro dispositivos, estos son:

1. El panel o módulo fotovoltaico.
2. El controlador o regulador de carga.
3. La batería.
4. El inversor.

Los **paneles fotovoltaicos** son fabricados a partir de materiales semiconductores, comúnmente de silicio mono-cristalino, que generan una corriente eléctrica a partir del efecto fotovoltaico, es decir, transforman la energía solar en energía eléctrica (rendimiento aproximado de 18 %).

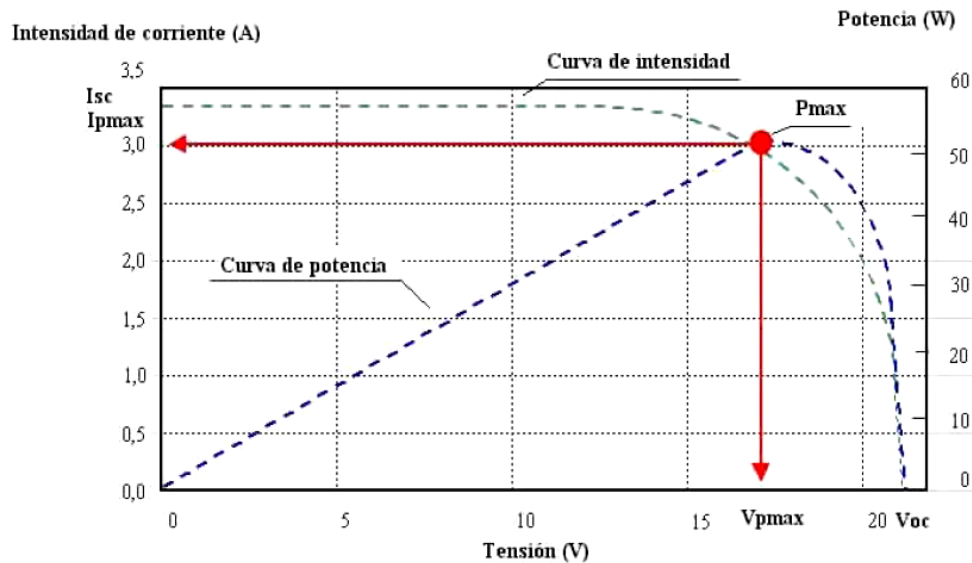


Figura 1.- Curva característica de un panel fotovoltaico

Esta energía eléctrica se acumula en una **batería** para disponer de la misma durante periodos nocturnos o de poca irradiación solar.

Entre el panel fotovoltaico y la batería es necesario incluir un **regulador de carga** de modo que, cuando la batería esté cargada, el regulador cierre la alimentación de energía desde los paneles solares a la batería para impedir la sobrecarga de ésta y por consiguiente el acortamiento de su vida útil.

Finalmente, la energía acumulada por la batería (en forma de corriente continua) puede emplearse como tal en luminarias y otros equipos, como los equipos de radio de baja

potencia. Esta energía eléctrica también puede ser transformada a corriente alterna, por medio de un **inversor** (220 V y 60 Hz) en forma de onda sinusoidal pura, que es el estándar eléctrico en el Perú, pudiendo entonces alimentar equipos que trabajan con corriente alterna.

---

## 2. PARTE PRÁCTICA:

---

### 2.1 IDENTIFICACIÓN DE TODOS LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO Y SU FUNCIÓN.

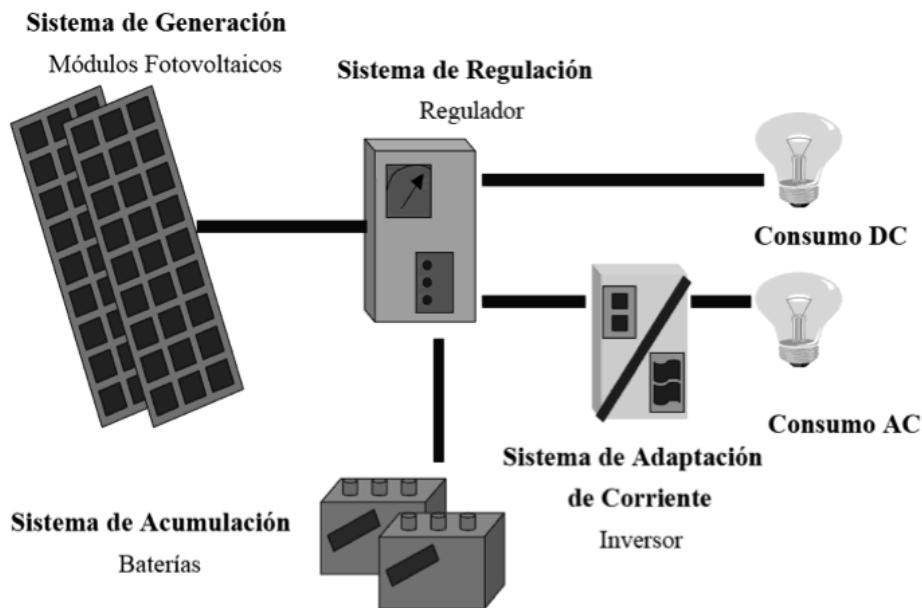


Figura 2.- diagrama unifilar de un sistema fotovoltaico autónomo.



#### PANEL FOTOVOLTAICO

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### CONTROLADOR DE CARGA

.....

.....

.....

.....

.....



### BATERÍA SOLAR

.....

.....

.....

.....

.....

### INVERSOR

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

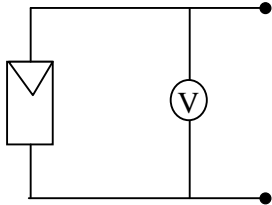
.....



## 2.2 MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DE TENSION Y CORRIENTE DEL PANEL FOTOVOLTAICO.

### a) Medida del Voltaje de circuito abierto de un panel fotovoltaico ( $V_{OC}$ )

Instalar el siguiente circuito:



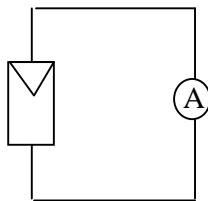
Medir con el multímetro el  $V_{OC}$  del panel fotovoltaico.

Anotar el valor del  $V_{OC}$  en la guía.

$V_{OC}$  = .....

### b) Medida de la corriente de corto circuito de un panel fotovoltaico ( $I_{SC}$ )

Instalar el siguiente circuito:



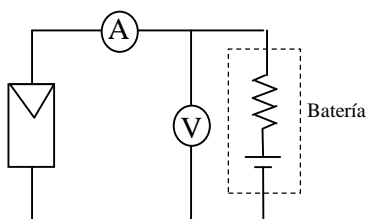
Medir con el multímetro la  $I_{SC}$  del panel fotovoltaico.

Anotar el valor del  $I_{SC}$  en la guía.

$I_{SC}$  = .....

### c) Medida del voltaje de operación ( $V_Q$ ) y corriente de operación ( $I_Q$ ) del sistema fotovoltaico en funcionamiento

Instalar el siguiente circuito:



Medir con el multímetro el  $V_Q$  y el  $I_Q$  del panel fotovoltaico.

Anotar el valor del  $V_Q$  y  $I_Q$  en la guía.

$V_Q$  = .....

$I_Q$  = .....

d) Bosquejar la curva característica del panel fotovoltaico

A partir de las medidas de de voltaje y corriente tomadas en la los incisos anteriores dibujar de manera aproximada la curva característica I-V del panel fotovoltaico.

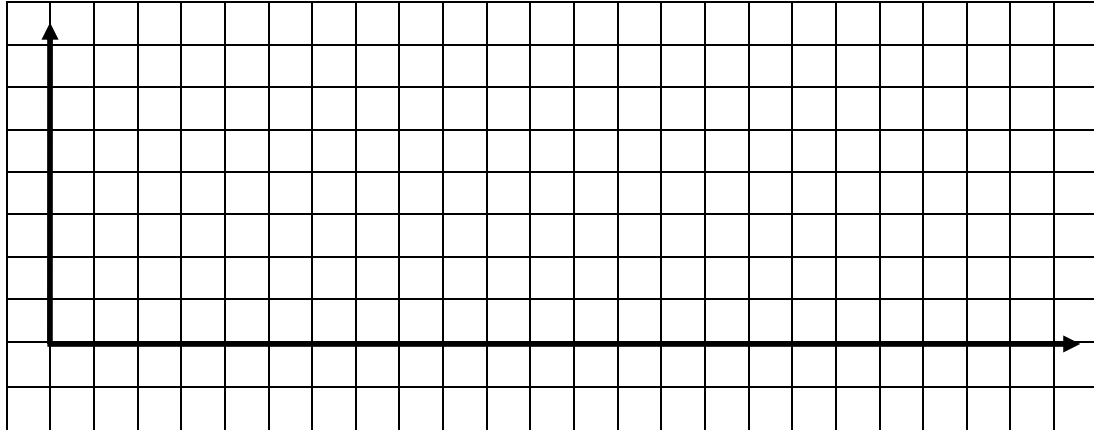


Figura 3.- Curva característica I-V

Observaciones del alumno:

.....

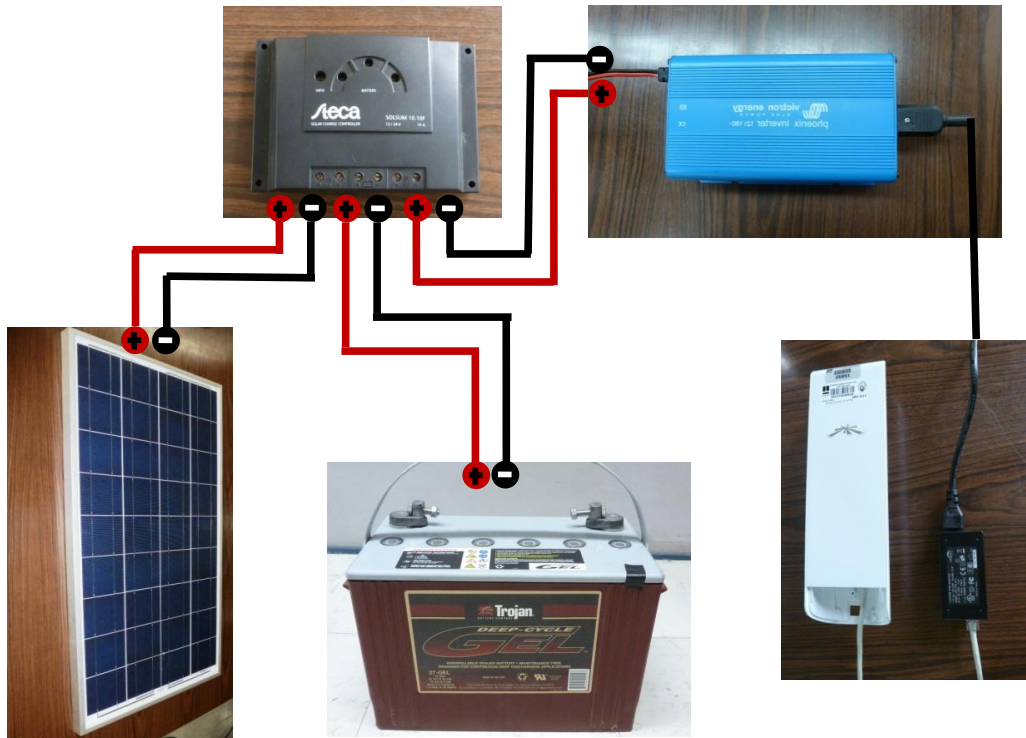
.....

.....

.....

### 2.3 INSTALACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.

- ❖ Buscar el norte magnético utilizando una brújula.
- ❖ Montar el panel fotovoltaico con su cara mirando hacia el norte e inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar.
- ❖ Instalar el siguiente circuito eléctrico:



### 2.4 DIMENSIONADO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA COMUNICACIONES

#### a) Estimar el consumo

- ✓ Identificar los tipos de carga a utilizar (corriente alterna o continua).
- ✓ A partir del ítem anterior llenar las siguientes tablas.

CARGAS DE CORRIENTE ALTERNA			
	consumo	horas/día	Whoras/día
<b>TOTAL</b>		<b>TOTAL</b>	





CARGAS DE CORRIENTE CONTINUA			
	consumo	horas/día	Whoras/día
	<b>TOTAL</b>	<b>TOTAL</b>	

- ✓ Calcular la carga en corriente continua ( $L_{DC}$ ) y alterna ( $L_{AC}$ ) dividiendo los respectivos consumos por el voltaje de trabajo del sistema (12V).

$L_{DC} = \dots\dots\dots$

$L_{AC} = \dots\dots\dots$

- ✓ Mediante la siguiente ecuación siguiente, calcular la carga requerida ( $L$ ).

$$L = L_{DC} + \frac{L_{AC}}{\eta_{inv}}$$

Donde:

- $L$  : Carga real necesaria (Ah/día)
- $L_{DC}$  : Cargas en corriente continua (Ah/día)
- $L_{AC}$  : Cargas en corriente alterna (Ah/día)
- $\eta_{inv}$  : Eficiencia media del inversor.

$L = \dots\dots\dots$

**b) Calculo del acumulador**

- ✓ Calcular la capacidad del banco de baterías, utilice la siguiente ecuación:

$$C_x = \frac{L * d}{P_d}$$

Donde:

- $C_x$  : Capacidad de la batería (Ah).
- $L$  : Carga real de consumo (Ah/día)
- $d$  : Días de autonomía de la instalación.
- $P_d$  : Profundidad de descarga máxima de trabajo.

$C_x = \dots\dots\dots$



- ✓ Calcule cuantas baterías de 100 Ah se necesita para satisfacer la demanda.

# De baterías = .....

**c) Cálculo del generador fotovoltaico**

- ✓ Calcule la potencia en paneles necesaria, para un lugar de 5 horas sol por día.

$$P_{necesaria\ en\ paneles} = \frac{L * 12}{5}$$

$P_{necesaria\ en\ paneles} = \dots\dots\dots$

- ✓ Calcular el número de paneles de 85 W necesarios para nuestro sistema.

# De paneles = .....

**d) Calculo del controlador de carga.**

- ✓ Calcule la máxima corriente que pasará por el controlador de carga.

$I = \dots\dots\dots$

**e) Cálculo del inversor DC/AC**

- ✓ Calcule la máxima potencia (corriente alterna) que será utilizada.

$P = \dots\dots\dots$



---

## LABORATORIO N° 3

---

**TEMA:** Soluciones inalámbricas malladas con software libre aplicados a localidades aisladas

**OBJETIVOS:**

- Demostrar la utilidad de las redes malladas en implementaciones de redes de comunicaciones en zonas aisladas.
- Identificar las tecnologías inalámbricas consideradas para el establecimiento de soluciones basadas en redes malladas para localidades aisladas.
- Aprender a configurar equipos inalámbricos para implementar redes malladas.
- Aprender a utilizar utilitarios que permitan evaluar el *throughput* de redes de datos.

**EQUIPOS Y MATERIALES:**

Por grupo (6 grupos)

- 1 Computadora personal con SO Windows y software IPERF y Putty
- 1 Radio Nanostation M5
- 1 Trípode
- 2 cables de red directos en buen estado
- 1 Mesa de trabajo
- 1 Regleta con conexión a la red eléctrica (extensión de ser necesaria)

Para toda la clase

- 2 radios Rocket M5

---

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO:

Las redes inalámbricas se clasifican en redes de infraestructura y en redes *ad-hoc*. Las primeras están basadas en el uso de puntos de acceso a través de los cuales las estaciones de trabajo acceden a Internet o se conectan a otra estación de trabajo. En una red *ad-hoc* una estación de trabajo puede establecer conexión con otra sin necesidad de la intermediación de un punto de acceso. A su vez, las redes *ad-hoc* se pueden clasificar, de acuerdo a su característica de enrutamiento, en redes de un salto (redes en las cuales una estación sólo puede establecer comunicación con otra que esté en su región de cobertura) y en redes *ad-hoc* multisalto (redes en las cuales las estaciones pueden comunicarse con estaciones lejanas que no se encuentran en su área de cobertura a través de múltiples saltos a través de nodos intermedios haciendo para ello uso de protocolos de enrutamiento). Un ejemplo de un tipo de red *ad-hoc* de un salto es la tecnología Bluetooth mientras que ejemplos de redes multisalto son las redes malladas de sensores y las redes malladas inalámbricas IP. Otra clasificación de las redes *ad-hoc* toma en cuenta la propiedad de movilidad de los nodos que las conforman. Es así que se tienen redes móviles *ad-hoc* (MANETs – Mobile Ad-Hoc Networks) y redes estáticas *ad-hoc* (SANETs – Static Ad-Hoc Networks).

Los objetivos de diseño de una típica red IP es que permita emitir y recibir flujos de datos a alta velocidad, con valores mínimos de retardo, variación del retardo, pérdida de paquetes y número de paquetes recibidos con error. Esto es válido tanto para redes cableadas como inalámbricas. El ahorro de consumo de energía, por lo general, no se considera de importancia porque los sistemas se supone que funcionan con energía eléctrica obtenida de la red pública, condición que muchas veces no es posible de conseguir en un entorno rural en el que la energía, es un recurso limitado y poco económico. Es por ello que las redes *ad-hoc* se perfilan más adecuadas para entornos rurales, ya que con un menor costo y consumo de energía pueden dar servicio en áreas relativamente extensas en comparación con las redes de infraestructura.

### 1.1. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN REDES MALLADAS

Debido a que los protocolos de encaminamiento comunes provocaban que se generasen bucles en redes que cambiaban rápidamente su topología (caída de enlaces, nodos móviles...), es necesario el uso de protocolos de encaminamientos específicos para redes malladas.

Debido a que el enrutamiento estático no es una opción viable para redes malladas (imposibilidad de adaptarse, mala escalabilidad...), los protocolos de enrutamiento han de ser dinámicos. En general los protocolos de enrutamiento dinámicos pueden clasificarse de acuerdo al momento en el cual actualizan sus tablas de enrutamiento como protocolos proactivos y reactivos. Los protocolos proactivos son aquellos que buscan mantener permanentemente las tablas de enrutamiento de los enrutadores actualizadas, de tal manera que las solicitudes de transmisión de paquetes sean atendidas inmediatamente, para ello se requiere la transmisión de paquetes periódicamente o como respuesta a un evento dado.

Ejemplos de este tipo de protocolos son RIP, OSPF y OLSR. Los protocolos de enrutamiento reactivos son aquellos que incluyen las rutas en las tablas de enrutamiento de los enrutadores en el momento en el cual se vayan a utilizar, por lo que se agrega un retardo adicional



correspondiente a esta tarea. Debido a que los protocolos reactivos no requieren del intercambio permanente de paquetes sobre la red, son más adecuados en entornos en los que el ahorro de energía es vital, como por ejemplo una red de sensores alimentados por baterías. En este documento nos centraremos en los protocolos de encaminamiento proactivos, debido a que dan mayores prestaciones a la hora de crear redes comunitarias malladas (que generalmente no se basan en sensores sino en equipos más potentes como routers, o antenas).

Los protocolos de enrutamiento utilizan el valor de un parámetro, o una combinación de varios de ellos, para determinar la mejor ruta que un paquete que entra a un enrutador puede tomar, de acuerdo al parámetro de interés. Tales parámetros vienen a ser denominados métrica. Ejemplos de ellos son el número de saltos, el retardo, el ancho de banda, etc. Algunas de las métricas consideradas en protocolos de enrutamiento utilizadas en redes ad-hoc malladas son Hop Count (basada en el número de saltos, considerando como salto a un enlace inalámbrico) o otras métricas relacionadas con la calidad del enlace como ETX (Expected Transmission Count), ETT (Expected Transmission Time), WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time), etc. La elección de la métrica, o su diseño, es un aspecto muy importante que debe ser considerado para el entorno en el cual la red será instalada. ETX es una de las métricas más extendidas y fue, probablemente, la primera métrica diseñada para MANETs partiendo de la observación de que el considerar al mínimo número de saltos como métrica para seleccionar una ruta no es adecuado para una red inalámbrica mallada. La métrica ETX busca predecir el número de transmisiones y su valor es el número de intentos de retransmisión necesarios para enviar un paquete por un enlace de manera exitosa. El valor de ETX varía de 1 (máxima calidad en el enlace) a infinito (enlace caído) y se calcula como la inversa de la suma de LQ y NLQ, donde LQ es la calidad de un enlace y NLQ es la calidad de los enlaces que tiene un determinado vecino.

Los protocolos de enrutamiento proactivos más utilizados para redes malladas IP son:

#### **OLSR** (Optimized Link State Routing, definido en la *RFC 3626*)

Se trata del protocolo de enrutamiento para redes malladas más antiguo y extendido en la actualidad. Se trata de un protocolo de funcionamiento similar a OSPF, pero orientado a este tipo de redes. Esto incluye cambios en cómo hacer el cálculo de red, cómo calcular las métricas o la forma de enviar los mensajes de control. Existen distintas versiones del protocolo que usan distintas métricas. Actualmente se usa ETX como métrica.

Con OLSR, los nodos conocen la mejor manera de encaminar los paquetes teniendo en cuenta la calidad del enlace, aunque se añade algo de carga adicional en los nodos al calcular el algoritmo de Dijkstra.

Al igual que otros protocolos SPF, en OLSR, todos los nodos conocen la topología total de la red gracias a los mensajes de propagación Hello y TC (cambio de topología), aunque dichos mensajes se envían de forma no fiable, asumiendo que algunos paquetes se perderán debido a la naturaleza inestable de las redes inalámbricas.

También utiliza los MPR (Multi Point Relay), los cuales son nodos encargados de agregar mensajes de control y retransmitirlos en *broadcast* para minimizar la congestión de red debida al tráfico de control, así como para reducir la carga de procesamiento en los nodos “no-Relay”. La red mesh se conecta hacia otras redes por medio de pasarelas, que anuncian su existencia a través de los mensajes HNA (Host Network Association). El número máximo de nodos que una misma red mesh con OLSR puede gestionar sin una reducción notable de las prestaciones está en torno a 100.

**B.A.T.M.A.N** (Better Approach To Mobile Adhoc Networking – Draft experimental), B.A.T.M.A.N es un nuevo protocolo de encaminamiento diseñado para redes malladas/ad-hoc que se ideó para intentar mejorar el protocolo OLSR. En B.A.T.M.A.N, ningún nodo tiene la información completa de la topología de la red, aunque sí se conocen todos los nodos que forman parte de la red. Así pues, para construir su tabla de encaminamiento almacena qué enlace hacia sus vecinos es el óptimo para cada destino. Para saber cuál es el mejor enlace hacia un nodo, se cuentan los paquetes que llegan de cada nodo. El enlace por el que lleguen más paquetes de un nodo concreto, será el mejor enlace para enviar paquetes a dicho nodo. De esta manera se comparte el conocimiento de la topología de la red de forma distribuida, donde cada nodo sólo almacena la mejor dirección para cada destinatario. Ésta métrica usada por B.A.T.M.A.N es específica del protocolo y se llama TQ (transmisión quality). Existen varias implementaciones del protocolo B.A.T.M.A.N. Las más importantes son, la implementación original Batmand que trabaja a nivel 3 de la arquitectura OSI, y Batman-adv, una implementación del protocolo que trabaja con direcciones MAC a nivel 2.

#### **HWMP** (Hybrid Wireless Mesh Protocol)

El protocolo por defecto que se usa en el estándar 802.11s. Este protocolo de encaminamiento es una combinación de AODV y un protocolo SPF mallado. Soporta ambos modos de funcionamiento (pero no simultáneamente). La métrica usada en ambos modos es el “Air-time”, y tiene en cuenta tanto la tasa de pérdida de tramas como el ancho de banda del enlace. Esto también lo hace la métrica ETT (Expected Transmission Time), sin embargo, Airtime también tiene en cuenta la sobrecarga del canal de acceso y de protocolo. La métrica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_a = \left[ O + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{pt}}$$

Donde  $O$  es la constante que cuantifica la sobrecarga del canal de acceso y del protocolo de nivel de enlace.  $B_t$  es la longitud de la trama de prueba en bits,  $r$  es la tasa de transmisión en Mbps y  $e_{pt}$  es la tasa de pérdida de las tramas de prueba.

Los nodos monitorizan y prueban continuamente sus enlaces para mantener la métrica actualizada con el estado de la red, y en ambos modos, son los nodos destino los que calculan la ruta óptima hacia un nodo origen. La diferencia entre ambos modos es que en el modo reactivo, es el nodo origen quien inunda la red para solicitar la ruta al nodo destino, mientras que en el modo proactivo, el nodo origen pregunta directamente a un nodo “root” que conoce la situación exacta del nodo destino ahorrando retransmisiones de paquetes por la red.

#### **AWPP** (Adaptive Wireless Path Protocol de Cisco)

Se trata de un protocolo propietario de Cisco específicamente diseñado para redes malladas. Descubre dinámicamente los nodos vecinos y calcula la calidad de todos los posibles caminos hacia un determinado gateway. La especificación del protocolo está definida en el grupo de trabajo de 802.11s.

## 1.2. PROBLEMÁTICA DE LAS REDES MALLADAS

De forma general, podemos reducir las ventajas de las redes malladas a:

- Permiten desplegar redes rápidamente y de forma automática, reduciendo bastante los costes de conexión de la red con otros sistemas autónomos (backhaul de bajo coste)
- Dan acceso fácilmente en áreas donde las redes fijas son costosas o imposibles, incluyendo zonas aisladas sin línea de vista
- Son escalables y resistentes a cambios de topología y caídas de enlaces
- Menor consumo de los nodos
- Capacidad de dar gran cobertura con pocos nodos debido al encaminamiento multi-salto y garantizan una alta disponibilidad a los servicios ofrecidos por la red gracias al alto número de conexiones redundantes.

Las ventajas antes mencionadas se pueden obtener a costa de una mayor complejidad de los protocolos utilizados en redes malladas con respecto a aquellos utilizados en redes del tipo infraestructura (acceso al medio, enrutamiento y seguridad). Asimismo, se introducen retardos adicionales provocados por los múltiples saltos, debido al tiempo de procesamiento de cada nodo. Por otro lado, el throughput o velocidad de transmisión disponible también se ve afectado por estos múltiples saltos. Cuantos más saltos, más nodos activos existen en un mismo canal inalámbrico. Esto provocará mayores colisiones debido a que el espectro estará compartido por más nodos, y se traducirá en una reducción de velocidad de transmisión.

En general, para  $N+1$  nodos compartiendo el mismo medio inalámbrico (misma área de cobertura), se observa una velocidad de transmisión determinada por:

$$ThroughputEfectivo = \frac{ThroughputMax}{N}$$

Donde *ThroughputMax* es la velocidad máxima disponible en un enlace de 1 salto, sin ningún otro nodo en el medio. Por ese motivo, generalmente en un mismo medio se obtendrán mayores velocidades en enlaces con pocos saltos, mientras que la menor velocidad se obtendrá en una ruta en cascada con todos los nodos activos en la misma área de cobertura.

Adicionalmente, para el caso de los protocolos, mallados proactivos, la velocidad de transmisión se ve afectada también debido a la continua transmisión de mensajes de control hacia el medio. Esta reducción a causa de los mensajes de protocolo puede ser mínima en redes pequeñas, pero siempre será significativa en redes grandes con un elevado número de nodos.

## 1.3. IMPLEMENTACIÓN DE REDES MALLADAS

Existen en la actualidad varias distribuciones de software libre, generalmente basadas en OpenWRT o DD-WRT, que integran paquetes software así como los módulos correspondientes a los protocolos de enrutamiento para redes malladas, facilitando la labor de instalación y configuración al usuario. Entre ellas se pueden mencionar Commotion (basada en OLSR para algunos dispositivos Ubiquiti), Freifunk (basada en OLSR para algunos dispositivos Linksys), R.O.B.I.N. (basada en OLSR o B.A.T.M.A.N. para dispositivos Ubiquiti, D-Link y otros) que funcionan con OpenWRT. En realidad es posible incorporar cualquier soporte para redes malladas sobre un sistema con OpenWRT, sin embargo es la alternativa más compleja y demandante en tiempo.

#### 1.4. IMPLEMENTACIÓN COMMOTION

Commotion es una de las distribuciones para redes malladas más intuitivas y sencillas. Debido a que la mayor parte de dispositivos inalámbricos están preparados para conectarse a través de redes del tipo infraestructura, utilizando puntos de acceso, la distribución Commotion lo contempla permitiendo que las radios se comporten también como puntos de acceso. Una vez que se hayan configurado correctamente las radios, es posible hallar los puntos de acceso Commotion en la lista de redes inalámbricas detectadas por el sistema operativo. Su nombre por defecto tiene la estructura "commotion-ap\_###\_###\_###", tal como se muestra en la figura 1. Las direcciones IP son asignadas dinámicamente por las radios a través del uso del protocolo DHCP según un rango de direccionamiento propio de cada nodo. También es posible observar una conexión encriptada al access point conectándonos a una red con un nombre como "commotion-secure\_###\_###\_###".

Para generar una dirección IPv4 para la interfaz de red mallada de sus nodos de forma que sea prácticamente única, Commotion usa la dirección MAC del nodo. Se construye de la siguiente forma "5.m4.m5.m6" con máscara 255.0.0.0, donde m4, m5 y m6 son los bytes 4,5 y 6 de la dirección MAC. Para las interfaces ap inalámbricas se usan las direcciones 101.m5.m6.0/24 y mediante DHCP se asignan a los nodos direcciones en el rango de 101.m5.m6.[2-252]. Para el caso de las subredes cableadas se usan las direcciones 102.m5.m6.0/24 y se asignan a los nodos direcciones en el rango de 102.m5.m6.[2-252]

Para proporcionar una conexión bidireccional entre internet y los nodos clientes, además de habilitar NAT, hay que usar el port forwarding. Commotion no usa NAT para conectar los clientes. En Commotion cada cliente puede conectarse directamente con otro nodo cliente sin necesidad de otros mecanismos de encaminamiento.

Para conectar los nodos clientes a internet, Commotion hace uso del plugin olsrd\_dyn\_gw.so.0.5, que detecta automáticamente conectividad a internet, y difunde los HNA hacia los nodos de la red.

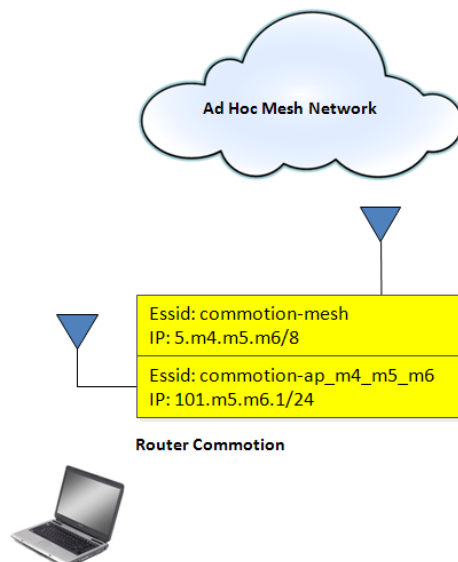


Figura 1. Tipos de direcciones IP asociadas a dispositivos conformantes de la red mallada

Si una de las radios está conectada a Internet (a través de uno de los puertos cableados), las otras la utilizarán para salir a Internet.





## 1.5. REDES MALLADAS EN EL MUNDO

Existen muchos proyectos de implementación de redes malladas en zonas aisladas en diferentes partes del mundo. Entre las más importantes se pueden mencionar las siguientes:

### 1.5.1. Village Telco

El proyecto Village Telco es una iniciativa para construir una red comunitaria inalámbrica de bajo coste que dé servicio telefónico y, opcionalmente, acceso a Internet en áreas rurales o aisladas. Se basa en un conjunto de software y hardware específico con el que se puede configurar de forma fácil y rápida una red comunitaria mallada en cualquier parte del mundo con unos requisitos mínimos de energía. Los equipos de radio utilizados tienen la denominación de Mesh Potato, que es un dispositivo plug-and-play con capacidad de encaminamiento y cuenta con una interface ATA para comunicaciones de VoIP que hacen uso de teléfonos analógicos convencionales. La configuración de la red es automática y se comporta de manera flexible ante cambios de topología y movimiento de los nodos. El protocolo mallado usado es Batman-Adv, la versión de nivel 2 de B.A.T.M.A.N.

Village Telco surgió debido a la necesidad de millones de personas de tener un acceso a las comunicaciones, ya sean locales o a Internet, de forma barata en lugares poco accesibles o aislados, como lo son las zonas rurales en los países pobres.

Muchas de los pobladores de dichas zonas gastan gran parte de su salario (a veces hasta el 50%) en el uso de teléfonos móviles que usan las redes de la operadoras, que ofrecen servicios mucho más costosos para la población. Con el proyecto, se intenta rebajar el coste del uso de las redes a una pequeña fracción de lo que gastan actualmente, gracias al uso de su propia infraestructura.

### 1.5.2. Freifunk

Freifunk.net es una de las redes comunitarias más antiguas y con mayor experiencia en el mundo. Se trata de una red comunitaria sin ánimo de lucro que da soporte a redes inalámbricas libres en regiones de Alemania. Freifunk es parte de un movimiento internacional para redes inalámbricas abiertas, que actualmente cuenta con un amplio apoyo en muchos países, incluidos países pobres y en vías de desarrollo (Freifunk ha participado activamente en el desarrollo del proyecto Village Telco). Freifunk ofrece la facilidad de instalar el software necesario para la interconexión de redes malladas mediante un *firmware* adaptado al usuario basado en OpenWRT. Se puede considerar a Freifunk como la precursora de las redes comunitarias libres. Usa el protocolo OLSR, aunque hay regiones funcionando con B.A.T.M.A.N.

### 1.5.3. Guifi.net

Guifi.net es una red de telecomunicaciones desarrollada en España. Es abierta, libre y neutral. Se vertebra a partir de un acuerdo de interconexión en el que cada participante, al conectarse a la red, la extiende también. Los usuarios de Guifi.net son particulares, empresas y administraciones que construyen una red de telecomunicaciones ciudadana, esto es, una red que es propiedad de todos los que forman parte de ella y no depende de gobiernos ni ISP (proveedores de internet). Es una red abierta porque los datos de configuración de la red se publican para que, de esta manera, cualquier persona, empresa o administración pueda ver cómo está construida la red y, por tanto, tenga la capacidad de mejorarla, mantenerla y ampliarla. Es una red libre porque no hay nadie que pueda imponer restricciones. Es una red neutral respecto a los contenidos. Dentro de la red puede circular cualquier contenido que



alguien necesite: de interconexión de sedes, acceso a Internet... Guifi.net tiene zonas ad-hoc, pero en su mayor parte trabaja en modo infraestructura.

#### 1.5.4. Bogota-mesh

Bogota-mesh es una red inalámbrica cuyo objetivo es servir como plataforma para ayudar a disminuir la brecha digital de los habitantes de Bogotá y así ayudar a la creación de una red independiente, natural, comunitaria, sostenible y autónoma, donde los proyectos personales, educativos, culturales y sociales tengan acogida y se puedan difundir de manera libre por la red; sin restricciones de ningún tipo, sin depender de entidades donde se filtra y se restringe la información y sin los actuales límites que se encuentran en Internet. Bogota-mesh usa una implementación de B.A.T.M.A.N a nivel 3 de la comunidad argentina de Rosario, Lurgo-Mesh, llamada Nightwing, derivada de *batmand*.

#### 1.5.5. QuintanaLibre

QuintanaLibre es una red comunitaria del pueblo de José de la Quintana, Córdoba, Argentina. La red cuenta con 8 nodos activos, en una población de menos de 1000 habitantes. La penetración de la red ya es importante y el SSID, o identificador de red, es visible desde prácticamente todo el pueblo. Trabaja conjuntamente con DeltaLibre, otra red comunitaria Argentina. La red es mallada y utiliza el protocolo batman advanced para su enrutamiento dinámico.

Al igual que Guifinet no es puramente ad-hoc ya que algunos de los enlaces son en modo infraestructura, pero su carácter se orienta a topologías malladas. Algunos parámetros fundamentales tenidos en cuenta en su diseño fueron la utilización de equipos y materiales de bajo costo, así como la replicabilidad de la experiencia.

**2. PARTE PRÁCTICA:**

**2.1. INSTALACIÓN DE COMMOTION EN RADIOS UBIQUITI NANOSTATION M5 Y USO INICIAL DE LA INTERFAZ GRÁFICA**

**Paso 1:**

Realice las conexiones mostradas en la figura 2.

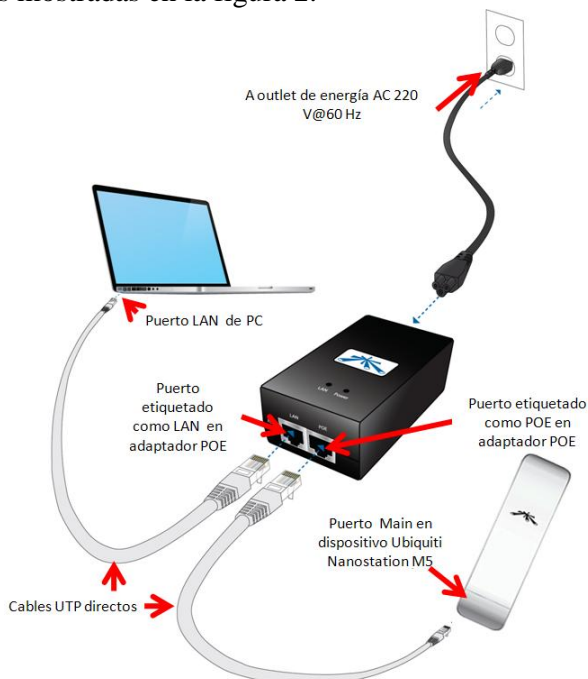


Figura 2. Conexión de radio Ubiquiti con PC (adaptado de datasheet)

**Paso 2:**

Descargue el archivo correspondiente a la distribución Commotion para la radio Nanostation M5 del sitio web <https://code.commotionwireless.net/projects/commotion/files> (Figura 3).

FICHERO	FECHA	TAMAÑO	D/L	MD5
<b>Nightly Builds</b>				
<a href="#">openwrt-ar71xx-generic-ubnt-bullet-m-squashfs-factory.bin</a>	2012-07-20 19:05	4,9 MB	50	6ca88e9ce85d79b8c4a63ad2e6c36462
<a href="#">openwrt-ar71xx-generic-ubnt-bullet-m-squashfs-sysupgrade.bin</a>	2012-07-20 19:05	4,9 MB	19	49dc4e85bc4d10870cde3da2e8a58369
<a href="#">openwrt-ar71xx-generic-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin</a>	2012-07-20 19:05	4,9 MB	28	0ef12d2954aea440c0f45d08fbed5020
<a href="#">openwrt-ar71xx-generic-ubnt-nano-m-squashfs-sysupgrade.bin</a>	2012-07-20 19:05	4,9 MB	11	dbdfe85b9b8fa2304ac0a54f9ba09fef
<a href="#">openwrt-ar71xx-generic-ubnt-rocket-m-squashfs-factory.bin</a>	2012-07-20 19:05	4,9 MB	12	03cb21e3466b24fad606cf519330d053
<a href="#">openwrt-ar71xx-generic-ubnt-rocket-m-squashfs-sysupgrade.bin</a>	2012-07-20 19:05	4,9 MB	13	711a7b4ca1b543b2bceb71a7731b38f5
<b>Bugfix Pre-release (PR2)</b>				
<a href="#">openwrt-ar71xx-ubnt-bullet-m-squashfs-factory.bin</a>	2011-09-17 20:19	4,6 MB	617	95d29582b6aa8ec727d403e3c0e1e628
<a href="#">openwrt-ar71xx-ubnt-bullet-m-squashfs-sysupgrade.bin</a>	2011-09-17 20:19	4,6 MB	192	f906318b954ea61aefa8913ba33d0e0b

Figura 3. Lista de imágenes de Commotion para radios Ubiquiti



**Paso 3:**

Se utilizará el cliente TFTP de Windows XP o se le habilitará en caso de contar con Windows 7 (*Panel de Control, Programas y Características, Activar o Desactivar las Características de Windows, Cliente TFTP, Aceptar*). Verifique que el sistema reconoce el comando *tftp* en el intérprete de comandos.

**Paso 4:**

Por defecto, las radios Ubiquiti tienen la IP 192.168.1.20 (de fábrica). Configure la interfaz cableada de la computadora con la IP 192.168.1.X/24. En donde X corresponde al identificador del grupo (1, 2, 3, 4, 5 ó 6). Verifique conectividad.

**Paso 5:**

Realice la siguiente secuencia de pasos para ingresar a la radio a su modo TFTP:

- Apagar la radio si es que estuviese encendida
- Presionar el botón reset de la unidad
- Encender la radio manteniendo presionado el botón reset
- Mantenga presionado el botón reset por casi 20 segundos (los leds parpadearán)
- Deje de presionar el botón de reset y verifique conectividad haciendo un ping a 192.168.1.20.

**Paso 6:**

A continuación transfiera el archivo imagen a la radio a través de la siguiente línea de comandos en una consola de Windows.

```
tftp -i 192.168.1.20 put openwrtxxx.factory.bin flash_update
```

Luego de unos pocos segundos se obtendrá una respuesta satisfactoria indicando la transferencia correcta del archivo (Figura 4). Esperar aproximadamente 10 minutos para continuar.

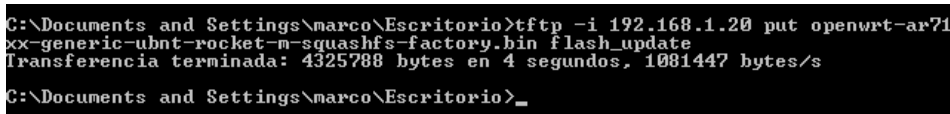


Figura 4. Transferencia satisfactoria de archivo a radio

**Paso 7:**

Apagar y encender la unidad de radio. Acceder a la interfaz web para la configuración de la radio escribiendo la dirección IP 192.168.1.20 en un navegador web tal como se muestra en la Figura 6. Tras de realizar los pasos anteriores será posible ver los identificadores de red (SSIDs) emitidos por las radios pertenecientes a la red mallada (si es que las tarjetas inalámbricas operaran en la banda 5.8 GHz) tal como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. SSIDs emitidos por los radios (en este caso sólo 2)

¿Por qué aparecen tres redes inalámbricas? ¿Qué significa cada una de ellas?

### Paso 8:

Establecer una contraseña para habilitar la configuración de la radio a través de SSH, por medio de un intérprete de comandos (Figura 6).



Figura 6. Interfaz web de configuración de radio nanostation M5

### Paso 9:

Para ver la topología de la malla con sus nodos, seguimos la siguiente ruta por medio de la interfaz Web: Status, OLSR y seleccionamos la opción OLSR-Viz (por defecto las radios trabajan en el canal 36 (5.180 GHz) y a una potencia de 17 dBm). Por lo que inicialmente todas las radios se verán como se muestra en la figura 7. Como se observa, se deberían ver todas con todas.

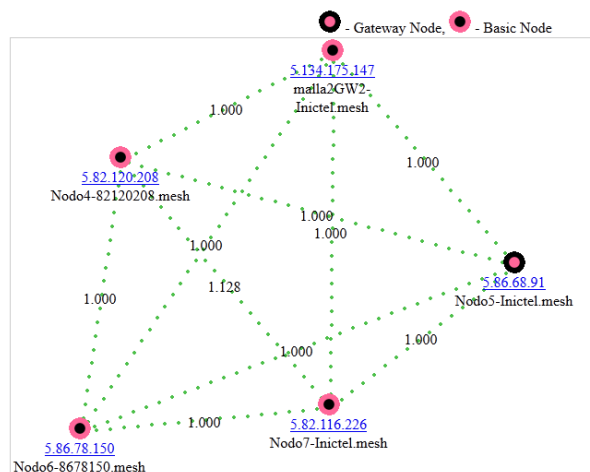


Figura 7. Topología inicialmente mostrada

¿Qué significan los números asociados a los enlaces? ¿Cómo se calcula?

## 2.2.IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED MALLADA

Para efectos de laboratorio, se implementará el esquema mostrado en la figura 8. En ella se emulados redes malladas ubicadas remotamente y conectadas a través de un enlace de larga distancia.

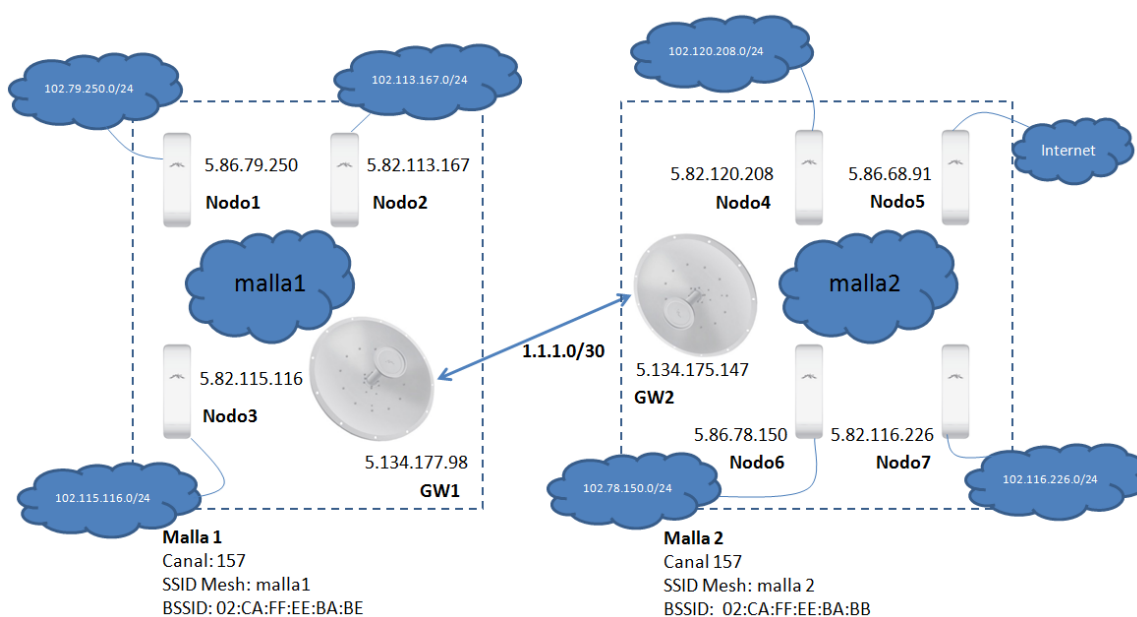


Figura 8. Escenario a implementar

Como indica la figura, se formarán dos mallas: la malla 1 conformada por los nodos: Nodo1, Nodo2 y Nodo3 y el GW1. La malla 2 estará formada por los nodos: Nodo4, Nodo5, Nodo6 y Nodo7. Ambas redes se interconectarán con un enlace punto a punto entre las Rocket M5 (GW1 y GW2), que también formarán parte de las mallas. Ambos equipos estarán en modo infraestructura, siendo GW1 el punto de acceso (maestro) con dirección IP 1.1.1.1 y GW2, el cliente con dirección IP 1.1.1.2. Sin embargo de cara a las 2 mallas, GW1 poseerá la dirección 5.134.177.98 y GW2 poseerá la 5.134.175.147, tal como se indica en la figura. Para facilitar el trabajo se proporciona la siguiente tabla resumen:

Tabla 1.Direccionamiento IP de las radios componentes de las mallas

Antena	Grupo	Dirección IP	Malla	Subred
Nodo1	1	5.86.79.250 /8	Malla1	102.79.250.0/24
Nodo2	2	5.82.113.167 /8	Malla1	102.113.167.0/24
Nodo3	3	5.82.115.116 /8	Malla1	102.115.116.0/24



Nodo4	4	5.82.120.208 /8	Malla2	102.120.208.0/24
Nodo5(pasarela)	-	5.86.68.91 /8	Malla2	-
Nodo6	6	5.86.78.150 /8	Malla2	102.78.150.0/24
Nodo7	7	5.82.116.226 /8	Malla2	102.116.226.0/24
GW1	-	5.134.177.98 /8	Malla1	-
GW2	-	5.134.175.147 /8	Malla2	-

**Configuración inalámbrica:**

**Paso 10:**

Para establecer 2 mallas distintas hemos de cambiar el SSID y el BSSID de cada antena. Para ello, mediante la interfaz web, vamos a Commotion → Mesh Configuration(Manual)

Base-name   
📘 The one-word name of the network, used to create SSIDs and hostnames.

Mesh SSID   
📘 The backhaul SSID of the mesh network.

Mesh BSSID   
📘 The backhaul BSSID of the mesh network, must be statically set for ad-hoc Wi-Fi.

Figura 9. Configuración de SSID y BSSID a través de interface Web

Y modificamos los valores del SSID y BSSID correspondientes a cada malla. El BSSID(Basic Service Set Identification) es el identificador de BSS de 6 octetos. El BSS(Basic Service Set) es conjunto de equipos que forman una determinada LAN inalámbrica 802.11. Mediante el identificador BSSID podemos asignar en qué red trabaja cada equipo. Para las WLAN en modo infraestructura, el BSSID es la dirección MAC del punto de acceso (maestro), mientras que en las redes ad-hoc el BSSID generalmente se genera de forma aleatoria. Para el caso de Commotion, la propia distribución genera un BSSID cualquiera, pero el usuario es libre de poner el que desee, siempre que no sea el mismo que el de las redes de su entorno.

El SSID es un identificador formado por 32 caracteres que agrupa uno o varios BSS. Este parámetro suele ser elegible para facilitar la interacción con el usuario.

Para la malla1 se usa el SSID “malla1” y BSSID “02:CA:FF:EE:BA:BE”. Para la malla2 se usa el SSID “malla2” y BSSID “02:CA:FF:EE:BA:BB”

Adicionalmente es conveniente cambiar el nombre de la antena para trabajar de manera más cómoda. Para ello modificamos el campo *Base-name*, e introducimos el nombre para el nodo.

**Encaminamiento:**

**Paso 11:**

Para que ambas redes puedan interconectarse, hemos de añadir a cada antena una entrada en la tabla de rutas por cada subred. Como hay 6 antenas operativas y cada antena tiene su propia subred, hemos de añadir en cada nodo 6 entradas. En las antenas de malla1 se deberán añadir que GW1 (5.134.177.98) sea la salida hacia las subredes de la malla2 y en las antenas de la malla2 se deberá añadir que GW2 (5.134.175.147) sea la salida hacia las subredes de la malla1. Esto se puede realizar mediante la interfaz web de la antena, o mediante línea de comandos.

Mediante la interfaz web, se ha de ir a Network → Static Routes

Y allí introducir, para cada entrada, los valores de la subred destino, la máscara de la subred destino, y el siguiente salto. La interfaz de la ruta ha de ser mesh. Los valores de la métrica y MTU no se modifican. Posteriormente pulsar el botón Add.

### Routes

Routes specify over which interface and gateway a certain host or network can be reached.

#### STATIC IPV4 ROUTES

Interface	Target	IPv4-Netmask	IPv4-Gateway	Metric	MTU
Host-IP or Network	if target is a network				
mesh	102.78.150.98	255.255.255.0	5.134.177.98	0	1500
<input type="button" value="Add"/>					

Figura 10. Configuración IP de las radios a través de interface Web

### Nota 1 (Opcional):

#### CONFIGURACIÓN DE RADIO A TRAVÉS DE INTERFAZ DE CONSOLA

Para la configuración de la radio a través de SSH, instale un cliente SSH en la computadora. Putty en nuestro caso. Acceda a la radio utilizando el usuario y contraseña antes definidos, tal como se muestra a continuación.

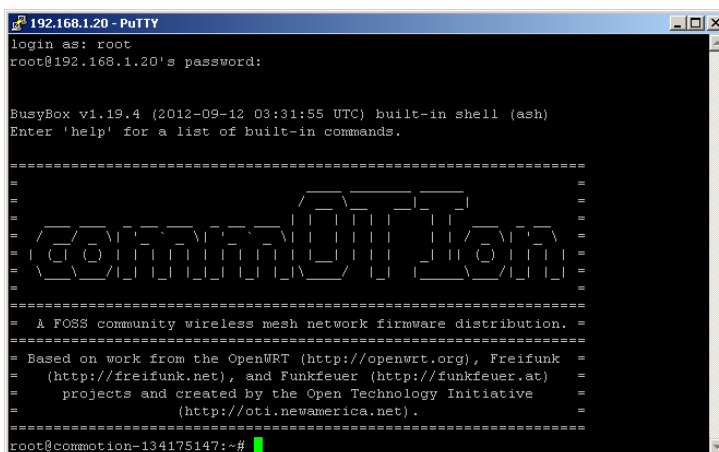


Figura 13. Acceso a la radio a través del uso de Putty





El archivo que contiene los parámetros de radio (potencia de transmisión, canal utilizado, selección de uso de 40 MHz, etc.) es /etc/config/wireless

El archivo que contiene la configuración de las interfaces físicas y lógicas existentes en la radio es /etc/config/network

Todas las configuraciones que se realizaron anteriormente a través de la interface web se pueden hacer ahora través de la edición de los archivos antes mencionados. Lo que se hará ahora es configurar **todas** las radios para que operen en el canal 157, de tal manera que se establezca una sola red mallada.

**Nota 2 (Opcional):**

Para añadir rutas mediante la línea de comandos hemos de conectarnos a la antena por ssh e introducir:

```
route add -net direccion_subred netmask 255.255.255.0 gw siguiente_salto
```

**Ejemplo:** Para el caso de los nodos de la malla 1, ruta desde Nodo1 hacia la subred de Nodo6:

```
route add -net 102.78.150.0 netmask 255.255.255.0 gw 5.134.177.98
```

**Ejemplo:** Para el caso de los nodos de la malla 2, ruta desde Nodo6 hacia la subred de Nodo1:

```
route add -net 102.79.250.0 netmask 255.255.255.0 gw 5.134.175.147
```

Mediante el establecimiento de estas rutas hemos de tener conectividad entre todos los equipos conectados a ambas mallas. Se podría dar conectividad a los nodos hacia las interfaces del radioenlace entre las RocketM5 (al direccionamiento 1.1.1.0/30), pero esto puede ser no recomendable ya que carece de utilidad.

**Paso 12:**

**Acceso a internet:**

Para dar acceso a Internet desde nuestras mallas hemos de establecer una ruta por defecto hacia el nodo que tenga salida a internet, en nuestro caso la antena Nodo5

Esto se puede establecer de manera intuitiva mediante la interfaz web en:

Network → Static Routes



### Routes

Routes specify over which interface and gateway a certain host or network can be reached.

#### STATIC IPV4 ROUTES

Interface	Target	IPv4-Netmask	IPv4-Gateway	Metric	MTU
	Host-IP, or Network	if target is a network			
mesh	0.0.0.0	0.0.0.0	5.86.68.91	0	1500
<input type="button" value="Add"/>					

Figura 11. Configuración de acceso a Internet

#### Nota 3 (Opcional):

Para añadir una ruta por defecto en las antenas de la red mallada basta con introducir el comando:

En las antenas de la malla1

```
route add default gw 5.86.68.91
```

En las antenas de la malla2

```
route add default gw 5.134.175.147
```

### 2.2.1. CONFIGURACIÓN DE RADIOS ROCKET M5

El instructor realizará estos pasos en las dos radios Rocket M5. Los pasos son indicados a continuación:

Para configurar las radios Rocket M5 se ha de *flashear* o cargar el fichero imagen los equipos al igual que se hizo con las NanostationM5, pero con una imagen distinta y específica para que trabaje con la tarjeta de red de la antena. La imagen a usar será:

```
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-rocket-m-squashfs-factory.bin
```

Una vez que los equipos tengan la distribución de Commotion correcta y se haya configurado la cuenta de administrador, hemos de asignar los SSID y BSSID correspondientes, a una radio los de la Malla1 y a otra los de la Malla2.

Una vez hecho esto, las RocketM5 deberán, cada una, formar parte de la red mesh, siendo capaces de ver al resto de los miembros de la malla.

Para conectar ambas mallas entre sí se va a usar una conexión en modo infraestructura. Para ello vamos a usar uno de los puntos de acceso por defecto de uno de los equipos RocketM5. El equipo que elijamos funcionará como punto de acceso (maestro) y el otro como cliente. En el cliente hay que eliminar el punto de acceso que se creó automáticamente, para ello vamos a *Network* → *Wifi* y allí eliminamos punto de acceso del RocketM5 cliente. Una vez hecho esto hay que conectarse al punto de acceso. Para ello pulsamos el botón *Scan*, y después hacer *click* en el botón *Join* de la red del RocketM5 maestro. Una vez hecho esto, basta con configurar las IP de las interfaces asociadas al enlace punto a punto que acabamos de crear.



Para ello, en ambos equipos, vamos a *Network* → *Interfaces* y pulsamos en el botón *Edit* de la interfaz ap. Allí ponemos la dirección IP que queramos. Al ser un enlace punto a punto el direccionamiento basta con que sea /30.

#### Nota 5 (Informativa):

##### Modificación de operación OLSR

Para configurar el funcionamiento de OLSR, podemos modificar algunos parámetros en el archivo `/etc/config/olsrd`.

Algunos de los parámetros más interesantes para modificar son:

IpVersion - para trabajar con IPv4 o IPv6

LinkQualityLevel - Puede valer 0-2. Con el valor 0, OLSR solo tiene en cuenta en número de saltos para escoger la mejor ruta hacia un destino. Con el valor 1, OLSR tiene en cuenta la calidad del enlace, usando la métrica ETX. Con el valor 2 tiene en cuenta la calidad del enlace además del número de saltos.

LinkQualityAlgorithm - Sólo para cuando `LinkQualityLevel` es 2. Se trata de los algoritmos usados para el cálculo de la ETX. Los posibles son:

-*etx\_float*: cálculo de ETX en coma flotante. Se usa un factor de envejecimiento exponencial para que las variaciones de ETX sean más suaves.

-*etx\_fpm*: igual que *etx\_float*, pero cálculo de ETX en enteros

-*etx\_ff*: variante de ETX realizada por Freifunk que usa todo el tráfico OLSR para el cálculo del ETX en lugar de sólo los paquetes Hello.

-*etx\_ffeth*: versión de *etx\_ff* que permite establecer ETX adecuados para enlaces cableados.

**SmartGW** - En el caso de que haya más de una pasarela, permite que OLSR pueda montar túneles IPoIP hacia una pasarela para evitar continuos saltos entre pasarela y asegurar la estabilidad del enlace. Sólo cambia cuando se supera un determinado límite entre la calidad de ambas rutas, que también se puede especificar.

Para más información sobre todas las opciones que ofrece OLSR se puede consultar el manual de `olsrd.conf`:

[https://code.commotionwireless.net/projects/commotion/wiki/Olsrd\\_Configuration\\_Options](https://code.commotionwireless.net/projects/commotion/wiki/Olsrd_Configuration_Options)

Además para monitorizar el estado de la red mallada, podemos hacer uso de los siguientes comandos:

<code>echo '/neighbours'   nc localhost 2006</code>	- Muestra la tabla de vecinos y la tabla de enlaces
<code>echo '/neigh'   nc localhost 2006</code>	- Muestra la tabla de vecinos
<code>echo '/link'   nc localhost 2006</code>	- Muestra la tabla de enlaces hacia los vecinos
<code>echo '/route'   nc localhost 2006</code>	- Muestra la tabla de rutas aprendidas con OLSR
<code>echo '/hna'   nc localhost 2006</code>	- Muestra los HNA recibidos



```
echo '/topo' | nc localhost 2006      - Muestra información sobre la topología mesh  
echo '/all' | nc localhost 2006     - Muestra toda la información anterior junta
```

Para que los cambios realizados tengan efecto es necesario que se reinicie el servicio de red y el demonio (proceso) olsr a través de la siguiente línea de comandos:

```
/etc/init.d/olsrd restart  
/etc/init.d/network restart
```

o reiniciar el router con:

```
exit && reboot
```

### 2.3.CONFIGURACIÓN DE NODO 5 PARA ACCESO A INTERNET

#### Paso 13:

En nuestra red, el Nodo5 ya ha sido configurado para que actúe como pasarela a Internet. Para ello simplemente se ha conectado el puerto principal directamente con el POE (puerto de alimentación) y el secundario se dejado sin usar. El cable con conexión a internet se ha de conectar en la interfaz eth0 (puerto LAN), y hemos de configurar la IP pública para esa interfaz. Esto se puede hacer rápidamente editando el fichero `/etc/config/network` y cambiando las direcciones IP de la interfaz LAN.

```
config 'interface' 'wan'  
    option 'ifname' 'eth1'  
    option 'proto' 'static'  
    option 'ipaddr' dirIP_publica  
    option 'netmask' '255.255.255.192'  
    option 'gateway' 'gwIP_publica'  
    option 'dns' '8.8.8.8'
```

#### Paso 14:

Adicionalmente hay que habilitar la traducción de direcciones. Mediante el enmascaramiento podemos conectar nuestra red, de direccionamiento privado a la red pública. Para hacer esto, hemos de introducir el siguiente comando:

```
/sbin/iptables -t nat -A POSTROUTING -o eth0 -j MASQUERADE
```

Es conveniente añadir el comando al fichero `/etc/rc.local` para que se ejecute cada vez que iniciamos el nodo.

Verifique el acceso a Internet desde cada uno de los nodos de la red mallada, a través del navegador.



En la gráfica de topología, ¿Las radios con acceso directo a Internet tienen una diferente representación?

---

---

## 2.4.PRUEBAS DE RENDIMIENTO DE RED MALLADA IMPLEMENTADA CON OLSR

Se hará uso de un software generador de tráfico para hallar el *throughput* que permite obtener los enlaces que se han establecido. El software elegido es IPERF.

### Paso 15:

Para ello, los grupos trabajarán en los siguientes pares: (1, 4), (2, 6) y (3, 7), es decir un grupo de la malla 1 con un grupo de la malla 2.

El grupo de la malla 1 ejecutará el software IPERF como servidor, de esta manera (se debe ‘estar’ en la carpeta en la que se tiene el ejecutable IPERF, o en su defecto, colocar la ruta completa para acceder a dicho comando):

```
iperf -s
```

El grupo de la malla 2 ejecutará el software IPERF como cliente a través de la siguiente línea de comandos:

```
iperf -c dirección_IP_del_servidor
```

¿Qué valor de *throughput* se obtiene? ¿Es éste el valor esperado? ¿Por qué?

---

---

Intercambie roles y realice las mismas pruebas

¿Qué valor de *throughput* se obtiene? ¿Es éste un valor similar al anterior? Justifique la respuesta

---

---



## D.2. Manual Taller de Comunicaciones Rurales para la FIEE-UNI

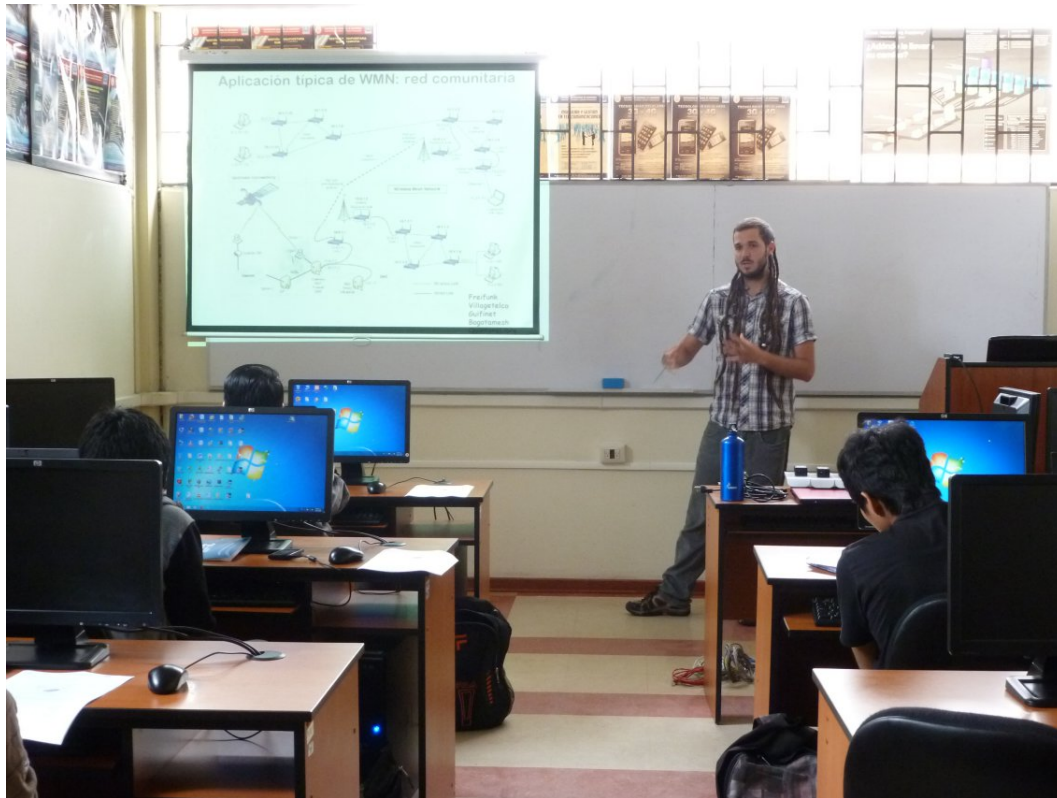


Figura D.2: *Impartición de una clase teórica en el taller de capacitación en redes malladas inalámbricas para entornos rurales a los alumnos de la FIEE*







# Talleres de Telecomunicaciones Rurales

## GUÍAS DE LABORATORIO

### **Talleres**

- ✓ *Construcción de una antena de banda ancha para acceso a redes inalámbricas en zonas aisladas*
- ✓ *Energías renovables para el desarrollo de las comunicaciones rurales*
- ✓ *Diseño e implementación de soluciones en redes inalámbricas malladas con software libre aplicadas en localidades aisladas*

### **Instructores:**

Ing. Ronald Paucar Curasma  
Ing. Marco Quispe Choquehuanca  
Ing. Esteban Municio Hernández  
Ing. Mariano Chuchón Núñez  
Ing. Rolando Adriano Peña



---

## LABORATORIO N° 1

---

---

**TEMA:** Construcción de una antena de banda ancha para acceso a redes inalámbricas en zonas aisladas

---

**OBJETIVOS:**

- Diseño y construcción de una antena casera
- Pruebas de parámetros de transmisión de la antena

---

**EQUIPOS Y MATERIALES:**

- Laptop con adaptador USB inalámbrico o PC con tarjeta de red inalámbrica
- Conector tipo N hembra para chasis
- 3 metros de cable RG58 (50 Ohm) conector Tipo N macho a SMA hembra
- Una lata de 8 a 9 cm de diámetro y de 14 a 15 cm de longitud
- 10 cm de alambre de cobre 2mm diámetro (12 AWG)
- Un caudín con estaño

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO:

### Antena

Es un dispositivo (conductor metálico) diseñado con el objetivo de emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa.



Figura 1. Antena directiva

### Impedancia de entrada

Tiene una componente resistiva y una reactiva; la impedancia de entrada es igual a la suma de la resistencia de radiación más la resistencia de pérdida. La impedancia de una antena de comunicaciones es de 50 OHM.

### Relación de Onda Estacionaria (ROE o SWR)

Para tener una buena transmisión de potencia entre el transmisor y la antena, es necesario que la impedancia del transmisor sea el conjugado complejo de la impedancia de la antena.

ROE: medida de desadaptación entre la impedancia del transmisor y de la antena.

A mayor ROE, es peor la adaptación.

ROE = 1 establece una adaptación perfecta.

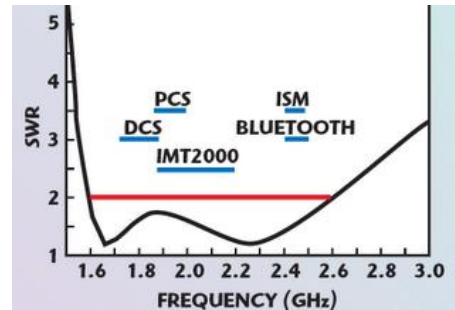


Figura 2. Dependencia del ROE con la frecuencia

### Directividad

Es la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección particular. Para un enlace inalámbrico que utiliza antenas fijas en ambos extremos, se puede utilizar esta directividad para concentrar la radiación en la dirección deseada.

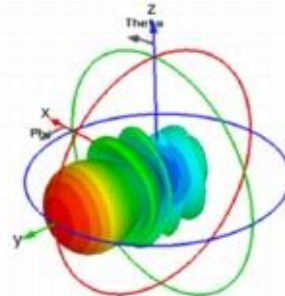


Figura 3. Diagrama en 3D de patrón de radiación de antena directiva

### Ganancia

Se define como la concentración de potencia en la dirección de máxima radiación. La Ganancia se produce por el efecto de la directividad al concentrarse la potencia en las zonas indicadas en el diagrama de radiación.

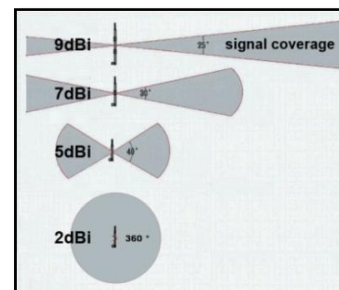


Figura 4. Patrón de radiación de diversos tipos de antenas en un plano

## Decibelios

El **decibel**, símbolo **dB**, es la unidad relativa empleada en telecomunicaciones para expresar la relación entre dos magnitudes: la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia.

- **dBW**: La W indica que el decibelio hace referencia a vatios. Es decir, se toma como referencia 1 W (vatio). Así, a un vatio le corresponden 0 dBW.
- **dBm**: Cuando el valor expresado en vatios es muy pequeño, se usa el milivatio (mW). Así, a un mW le corresponden 0 dBm.

La ganancia de un dispositivo, expresada en decibelios viene dada por la fórmula:

$$dB = 10 \times \log_{10} \frac{P_S}{P_E}$$

$P_E$  es la potencia de la señal en la entrada del dispositivo  
 $P_S$  la potencia a la salida del mismo.

## Polarización

Es la orientación de las ondas electromagnéticas al salir de la antena. Hay dos tipos básicos de polarización que aplican a las antenas, como son: Lineal (incluye vertical, horizontal y oblicua) y circular (que incluye circular derecha, circular izquierda, elíptica derecha, y elíptica izquierda), según el sentido de giro del campo (observado alejándose desde la antena).

La antena transmisora debe de tener la misma polaridad de la antena receptora para máximo rendimiento

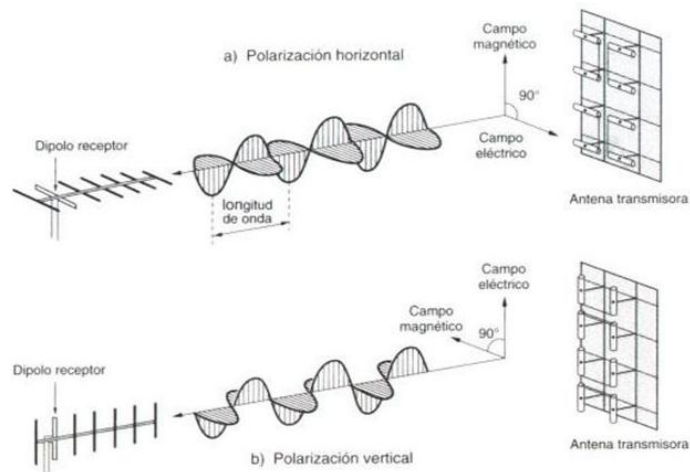


Figura 5. Polarización horizontal y vertical de las ondas electromagnéticas

## Ancho de banda

Es el margen de frecuencias en el cual los parámetros de la antena cumplen unas determinadas características.

Es el intervalo de frecuencias en la cual debe funcionar satisfactoriamente la antena.

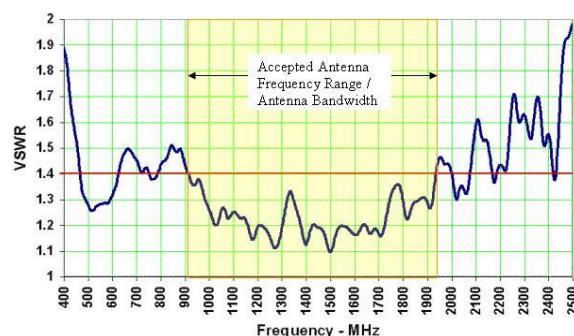


Figura 6. Rango de operación de una antena de acuerdo a su VSWR

### Patrón de Radiación

Es la representación gráfica de la forma en que la energía electromagnética de una antena se distribuye en el espacio, en función de la dirección (coordenadas en horizontal y vertical).

Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son:

**Dirección de apuntamiento:** Es la de máxima radiación.

**Lóbulo principal:** Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.

**Lóbulos secundarios:** Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.

El patrón de vertical es una gráfica de la energía radiada por la antena vista de perfil. El patrón de horizontal es una gráfica de la energía radiada vista directamente desde arriba. Al combinar ambas gráficas se tiene una representación tridimensional de como es realmente radiada la energía desde la antena.

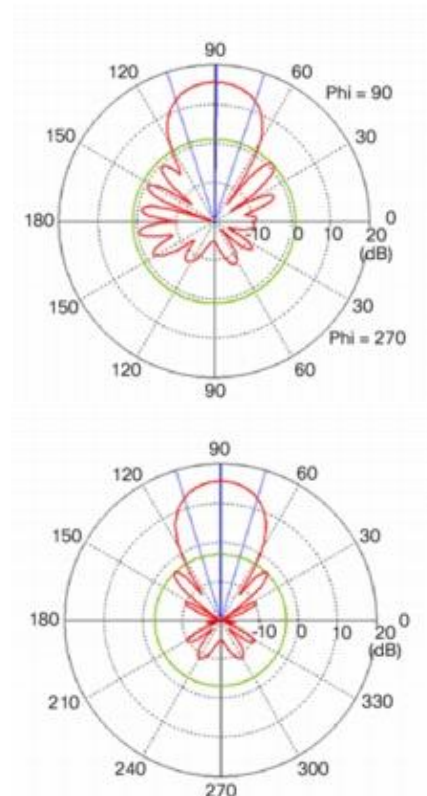


Figura 7. Diagramas de radiación horizontal y vertical

### Lambda (Longitud de onda, $\lambda$ )

Es el período espacial o la distancia que hay de pulso a pulso. Normalmente se consideran 2 puntos consecutivos que poseen la misma fase: 2 máximos, 2 mínimos, 2 cruces por cero.

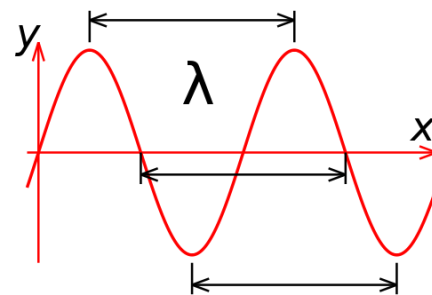


Figura 8. Definición de longitud de onda

### Frecuencia

Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. La frecuencia ( $f$ ) de una onda es el número de oscilaciones por segundo y se mide en hercios (Hz).

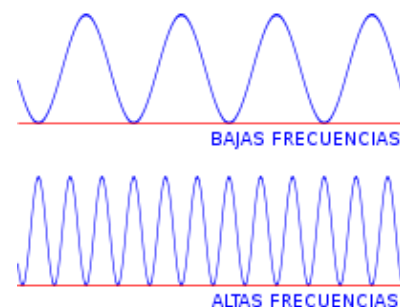


Figura 9. Dos tonos con diferentes frecuencias

## 2. PARTE PRÁCTICA:

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

Se implementará el escenario mostrado en la figura 10

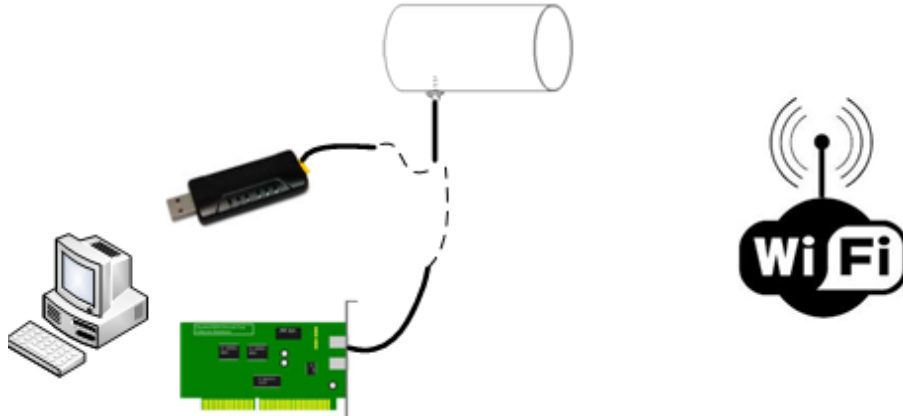
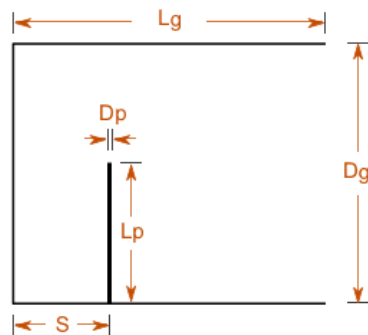


Figura 10. Accesorios utilizados en la práctica

Las longitudes de interés para la implementación de la antena circular de guía de onda son definidas a continuación:



- $D_g$  : Diámetro de lata
- $L_g$  : Longitud de la lata
- $L_p$  : Longitud del Radiador
- $S$  : Distancia del radiador
- $D_p$  : Diámetro de Radiador

Figura 11. Dimensiones de antena guía de onda

### 2.2 CÁLCULO DE DIMENSIONES DE LA ANTENA

Considere  $D_p = 2 \text{ mm}$ . Halle  $\lambda$  utilizando la siguiente relación

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\text{frecuencia}}$$

Frecuencia = \_\_\_\_\_ MHz

$\lambda$  = \_\_\_\_\_ metros

Halle  $\lambda_g$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\left\{1 - \left(\frac{\lambda}{1.706D_g}\right)^2\right\}^{0.5}}$$

$D_g = \text{_____ metros}$

$\lambda_g = \text{_____ metros}$

Halle  $S$  (ver figura 11)

$$S = \frac{\lambda_g}{4}$$

$S = \text{_____ metros}$

Halle  $L_g$  (ver figura 11)

$$L_g = \frac{3}{4}\lambda_g$$

$L_g = \text{_____ metros}$

Halle  $L_p$  (ver figura 11)

$$L_p = \frac{\lambda}{4}$$

$L_p = \text{_____ metros}$

Colocar las medidas de la antena construida en la figura 12.

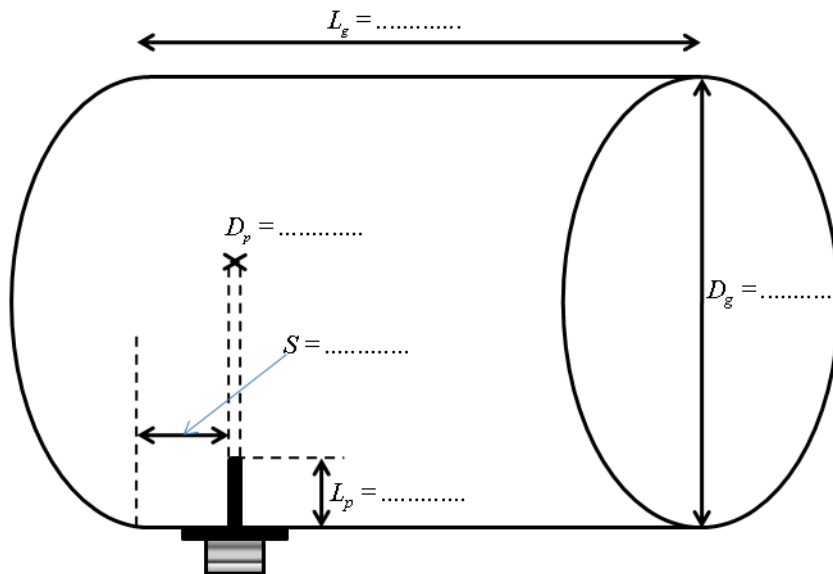


Figura 12. Dimensiones de antena construida

Anote observaciones

.....

.....



Dibujar la señal recibida por la antena en función del tiempo

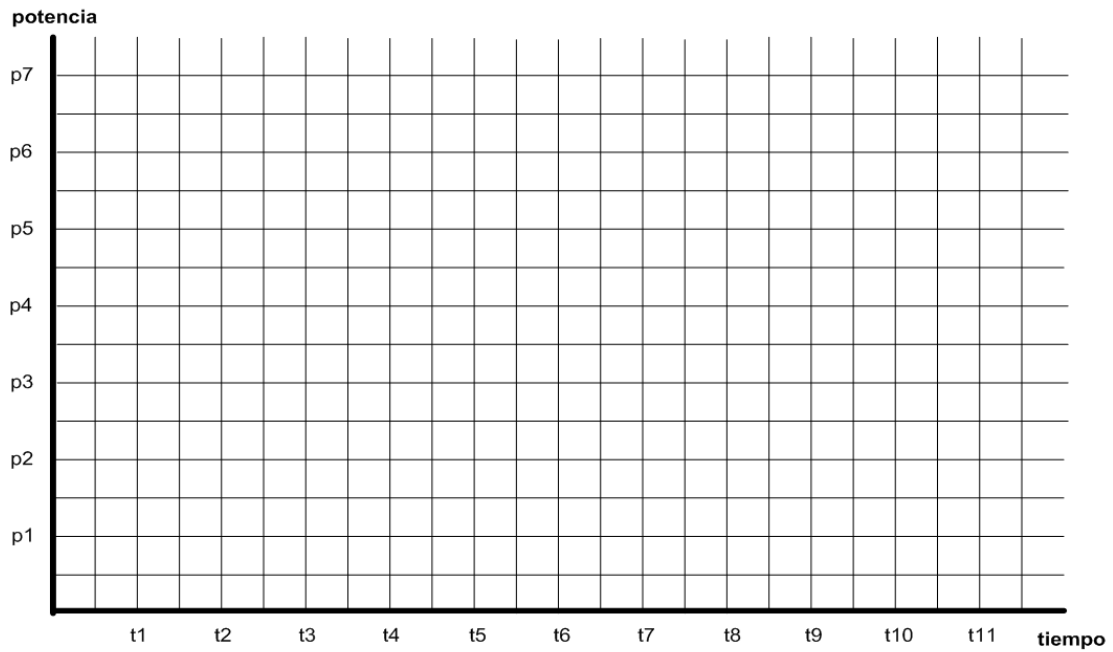


Figura 13. Variación de la potencia recibida haciendo uso de la antena construida con respecto al tiempo

**Observaciones del alumno:**

.....

.....

.....

.....

.....





---

## LABORATORIO N° 2

---

**TEMA:** Instalación de un sistema fotovoltaico para comunicaciones inalámbricas rurales.

---

### OBJETIVOS:

---

- Identificación de las partes y componentes de un sistema fotovoltaico
- Identificación de los parámetros intensidad de corriente y voltaje del panel fotovoltaico
- Instalación de un sistema fotovoltaico para comunicaciones
- Dimensionado de un sistema fotovoltaico para comunicaciones

---

### EQUIPOS Y MATERIALES:

---

- Guía de laboratorio
- 1 Panel fotovoltaico 85W
- 1 batería solar de 100hA
- 1 inversor de 180 W
- 1 controlador de carga de 15 A
- 2 multímetros Fluke
- 1 llave térmica
- 1 Brújula
- 1 Transportador
- 1 Nivel
- 1 Radio de banda ancha

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO:

### 1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son de baja potencia (menores a 10 kWp) que se instalan en lugares aislados donde no existe una red eléctrica. Un sistema fotovoltaico autónomo cuenta básicamente con cuatro dispositivos, estos son:

- El panel o módulo fotovoltaico.
- El controlador o regulador de carga.
- La batería.
- El inversor.

Los **paneles fotovoltaicos** son fabricados a partir de materiales semiconductores, comúnmente de silicio mono-cristalino, que generan una corriente eléctrica a partir del efecto fotovoltaico, es decir, transforman la energía solar en energía eléctrica (rendimiento aproximado de 18 %). En la figura 1 se muestra la curva característica de un panel fotovoltaico.

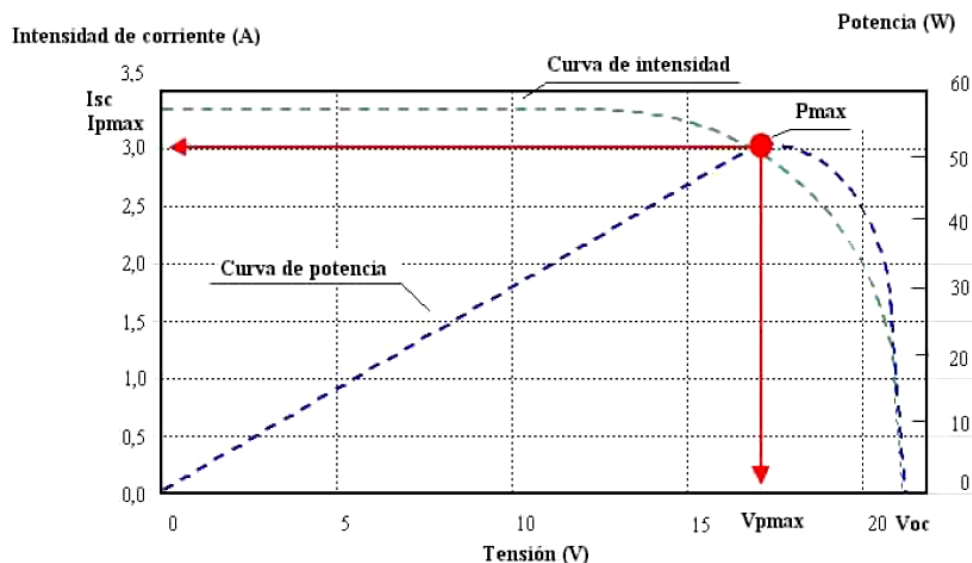


Figura 1. Curva característica de un panel fotovoltaico

Esta energía eléctrica se acumula en una **batería** para disponer de la misma durante periodos nocturnos o de poca irradiación solar.

Entre el panel fotovoltaico y la batería es necesario incluir un **regulador de carga** de modo que, cuando la batería esté cargada, el regulador cierre la alimentación de energía desde los paneles solares a la batería para impedir la sobrecarga de ésta y por consiguiente el acortamiento de su vida útil.

Finalmente, la energía acumulada por la batería (en forma de corriente continua) puede emplearse como tal en luminarias y otros equipos, como los equipos de radio de baja potencia. Esta energía eléctrica también puede ser transformada a corriente alterna, por medio de un **inversor** (220 V y 60 Hz) en forma de onda sinusoidal pura, que es el estándar eléctrico en el Perú, pudiendo entonces alimentar equipos que trabajan con corriente alterna.

**2. PARTE PRÁCTICA:**

**2.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO Y SU FUNCIÓN.**

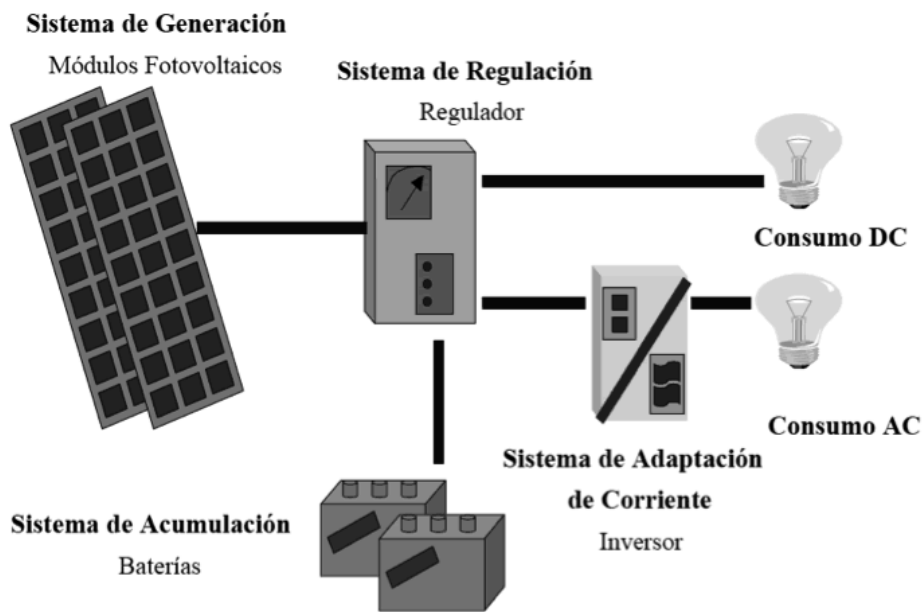


Figura 2. Diagrama unifilar de un sistema fotovoltaico

**Características y observaciones**



Figura 3. Panel fotovoltaico

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### Características y observaciones

.....

.....

.....

.....

.....



Figura 4. Controlador de carga

### Características y observaciones

.....

.....

.....

.....

.....



Figura 5. Batería solar

### Características y observaciones

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

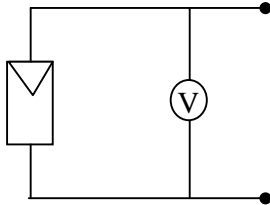


Figura 6. Inversor

## 2.2 MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DE TENSION Y CORRIENTE DEL PANEL FOTOVOLTAICO.

### a) Medida del Voltaje de circuito abierto de un panel fotovoltaico ( $V_{OC}$ )

Instalar el siguiente circuito:



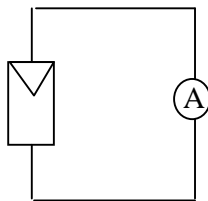
Medir con el multímetro el  $V_{OC}$  del panel fotovoltaico.

Anotar el valor del  $V_{OC}$  en la guía.

$V_{OC}$  = .....

### b) Medida de la corriente de corto circuito de un panel fotovoltaico ( $I_{SC}$ )

Instalar el siguiente circuito:



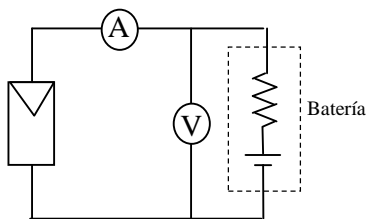
Medir con el multímetro la  $I_{SC}$  del panel fotovoltaico.

Anotar el valor del  $I_{SC}$  en la guía.

$I_{SC}$  = .....

### c) Medida del voltaje de operación ( $V_Q$ ) y corriente de operación ( $I_Q$ ) del sistema fotovoltaico en funcionamiento

Instalar el siguiente circuito:



Medir con el multímetro el  $V_Q$  y el  $I_Q$  del panel fotovoltaico.

Anotar el valor del  $V_Q$  y  $I_Q$  en la guía.

$V_Q$  = .....

$I_Q$  = .....



d) Bosquejar la curva característica del panel fotovoltaico

A partir de las medidas de de voltaje y corriente tomadas en la los incisos anteriores dibujar de forma aproximada la curva característica I-V del panel fotovoltaico.

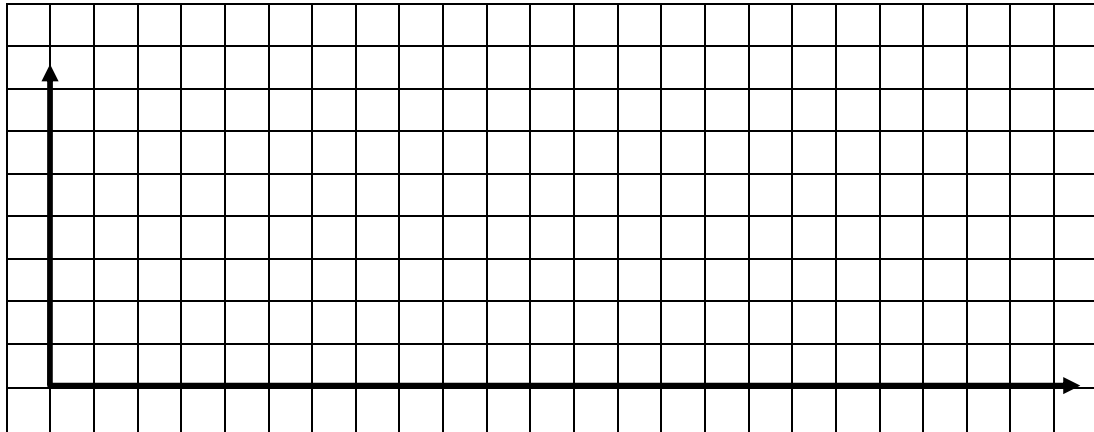


Figura 7. Curva característica I-V

Observaciones del alumno:

.....

.....

.....

.....

.....

### 2.3 INSTALACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.

- ❖ Buscar el norte magnético utilizando una brújula.
- ❖ Montar el panel fotovoltaico con su cara mirando hacia el norte e inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar.
- ❖ Instalar el siguiente circuito eléctrico:



Figura 8. Componentes de sistema fotovoltaico

Anote observaciones acerca de la instalación

.....

.....

.....

.....

### 2.4 DIMENSIONADO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA COMUNICACIONES

#### a) Estimar el consumo

- ✓ Identificar los tipos de carga a utilizar (de corriente alterna o continua).
- ✓ A partir del ítem anterior llenar las siguientes tablas.







$C_x = \dots\dots\dots$

- ✓ Calcule cuantas baterías de 100 Ah se necesita para satisfacer la demanda.

# De baterías =  $\dots\dots\dots$

**c) Cálculo del generador fotovoltaico**

- ✓ Calcule la potencia en paneles necesaria, para un lugar de 5 horas sol por día.

$$P_{necesaria\ en\ paneles} = \frac{L * 12}{5}$$

$P_{necesaria\ en\ paneles} = \dots\dots\dots$

- ✓ Calcular el número de paneles de 85 W necesarios para nuestro sistema.

# De paneles =  $\dots\dots\dots$

**d) Calculo del controlador de carga.**

- ✓ Calcule la máxima corriente que pasará por el controlador de carga.

$I = \dots\dots\dots$

**e) Cálculo del inversor DC/AC**

- ✓ Calcule la máxima potencia (corriente alterna) que será utilizada.

$P = \dots\dots\dots$



---

## LABORATORIO N° 3

---

**TEMA:** Soluciones inalámbricas malladas con software libre aplicados a localidades aisladas

---

### OBJETIVOS:

- Demostrar la utilidad de las redes malladas en implementaciones de redes de comunicaciones en zonas aisladas.
- Identificar las tecnologías inalámbricas consideradas para el establecimiento de soluciones basadas en redes malladas para localidades aisladas.
- Aprender a configurar equipos inalámbricos para implementar redes malladas.
- Aprender a utilizar utilitarios que permitan evaluar el *throughput* de redes de datos.

---

### EQUIPOS Y MATERIALES:

Por grupo (6 grupos)

- 1 Computadora personal con SO Windows, IPERF, Putty y Polycom PVX
- 1 Radio Nanostation M5
- 1 Trípode
- 2 cables de red directos en buen estado
- 1 cámara web con su driver
- 1 Mesa de trabajo
- 1 Regleta con conexión a la red eléctrica (extensión de ser necesaria)

Para toda la clase

- 2 radios Rocket M5 con sus platos reflectores



---

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO:

---

Las redes inalámbricas se clasifican en redes de infraestructura y en redes *ad-hoc*. Las primeras están basadas en el uso de puntos de acceso a través de los cuales las estaciones de trabajo acceden a Internet o se conectan a otras similares. En una red *ad-hoc* una estación de trabajo puede establecer conexión con otra sin necesidad de la intermediación de un punto de acceso. A su vez, las redes *ad-hoc* se pueden clasificar, de acuerdo a su capacidad de enrutamiento, en redes de un salto (redes en las cuales una estación sólo puede establecer comunicación con otra que esté en su región de cobertura) y en redes *ad-hoc* multisalto (redes en las cuales las estaciones pueden comunicarse con estaciones lejanas que no se encuentran en su área de cobertura a través de múltiples saltos realizados a través de nodos intermedios, haciendo uso para ello de protocolos de encaminamiento). Un ejemplo de un tipo de red *ad-hoc* de un salto es son los sistemas Bluetooth mientras que ejemplos de redes multisalto son las redes malladas de sensores y las redes malladas inalámbricas IP. Otra clasificación de las redes *ad-hoc* toma en cuenta la propiedad de movilidad de los nodos que las conforman. Es así que se tienen redes móviles *ad-hoc* (MANETs – Mobile Ad-Hoc Networks) y redes estáticas *ad-hoc* (SANETs – Static Ad-Hoc Networks).

### 1.1. PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO EN REDES MALLADAS

El encaminamiento estático no es una opción viable para redes malladas (imposibilidad de adaptarse, mala escalabilidad...) con una cantidad grande de nodos. De esta manera, los protocolos de enrutamiento han de ser dinámicos. En general éstos pueden ser clasificados, de acuerdo al momento en el cual actualizan sus tablas de enrutamiento, como protocolos proactivos y reactivos. Los protocolos proactivos son aquellos que buscan mantener permanentemente las tablas de enrutamiento actualizadas, de tal manera que las solicitudes de transmisión de paquetes sean atendidas inmediatamente. Para ello se requiere la transmisión de paquetes, de forma periódica o como respuesta a algún evento, con información de actualización de rutas o estados.

Ejemplos de tipos de protocolos proactivos son RIP, OSPF y OLSR. Los protocolos de enrutamiento reactivos son aquellos que incluyen nuevas rutas en las tablas de enrutamiento en el momento en el que se vayan a utilizar, por lo que se agrega un retardo adicional correspondiente a esta tarea. Debido a que los protocolos reactivos no requieren del intercambio permanente de paquetes sobre la red, son más adecuados en entornos en los cuales el ahorro de energía es vital como por ejemplo una red de sensores alimentados por baterías. En este documento nos centraremos en los protocolos de encaminamiento proactivos, debido a que dan mejores prestaciones al momento de crear redes malladas en las que se busque brindar servicios con calidad.

Los protocolos de enrutamiento utilizan el valor de un *factor de mérito* obtenido de forma directa a través de mediciones, o a través del cálculo de una combinación ponderada de varios parámetros, para determinar la mejor ruta que un paquete debe tomar al pasar por un enrutador. Dicho parámetro es denominado métrica. Ejemplos de métricas son el número de saltos, el retardo, el ancho de banda del enlace, etc. Algunas de las métricas consideradas en protocolos de enrutamiento utilizados en redes *ad-hoc* malladas son Hop Count (basada en el número de saltos, considerando como salto a un enlace inalámbrico) u otras métricas



relacionadas con la calidad del enlace como ETX (Expected Transmission Count), ETT (Expected Transmission Time), WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time), etc. La elección de la métrica o la definición de su cálculo es un aspecto muy importante que debe considerar las condiciones del entorno en el cual la red será instalada. ETX es una de las métricas más extendidas y fue, probablemente, la primera métrica diseñada para MANETs. Dicha métrica está basada en el número de intentos de retransmisión necesarios para enviar un paquete por un enlace de manera exitosa. El valor de ETX varía desde 1 (máxima calidad en el enlace) a infinito (enlace caído).

Los protocolos de enrutamiento proactivos más utilizados para redes malladas IP son:

#### **OLSR** (Optimized Link State Routing, definido en la *RFC 3626*)

Se trata del protocolo de enrutamiento para redes malladas más antiguo y extendido en la actualidad. Existen distintas versiones del protocolo que usan distintas métricas. Actualmente se usa ETX.

Con OLSR, los nodos conocen la mejor manera de encaminar los paquetes teniendo en cuenta la calidad del enlace, aunque se añade algo de carga adicional en los nodos al calcular el algoritmo de Dijkstra.

Al igual que otros protocolos SPF, en OLSR todos los nodos conocen la topología total de la red gracias a los mensajes de propagación Hello y TC (cambio de topología), aunque dichos mensajes se envían de forma no fiable pues algunos paquetes se perderán debido a la naturaleza inestable de las redes inalámbricas.

También utiliza los MPR (Multi Point Relay), los cuales son nodos encargados de agregar mensajes de control y retransmitirlos en *broadcast* para minimizar la congestión de red debida al tráfico de control, así como para reducir la carga de procesamiento en los nodos “no-Relay”. La red mallada se conecta hacia otras redes por medio de pasarelas, las cuales anuncian su existencia a través de los mensajes HNA (Host Network Association). El número máximo que una misma red mallada con OLSR puede gestionar sin una reducción notable de las prestaciones está en torno a 100 nodos.

#### **B.A.T.M.A.N** (Better Approach To Mobile Adhoc Networking – Draft experimental)

B.A.T.M.A.N es un nuevo protocolo de encaminamiento diseñado para redes malladas/ad-hoc que se ideó para intentar mejorar el protocolo OLSR. En B.A.T.M.A.N, ningún nodo tiene la información completa de la topología de la red, aunque sí se conocen todos los nodos que forman parte de ella. Así pues, para construir su tabla de encaminamiento almacena qué enlace hacia sus vecinos es el óptimo para cada destino. Para saber cuál es el mejor enlace hacia un nodo, se cuentan los paquetes que llegan de cada nodo. El enlace por el que lleguen más paquetes de un nodo concreto, será el mejor enlace para enviar paquetes a dicho nodo. De esta manera se comparte el conocimiento de la topología de la red de forma distribuida, donde cada nodo sólo almacena la mejor dirección para cada destinatario. Ésta métrica usada por B.A.T.M.A.N es específica del protocolo y se llama TQ (Transmisión Quality). Existen varias implementaciones del protocolo B.A.T.M.A.N. Las más importantes son la implementación original *Batmand*, que trabaja a nivel 3 de la arquitectura OSI, y *Batman-adv*, la cual es una implementación del protocolo que trabaja con direcciones MAC a nivel 2.

**HWMP** (Hybrid Wireless Mesh Protocol)

Es el protocolo por defecto que se usa en el estándar 802.11s. Este protocolo de encaminamiento es una combinación de AODV y un protocolo SPF mallado. Soporta ambos modos de funcionamiento (pero no simultáneamente). La métrica usada en ambos modos es el “Air-time”, y tiene en cuenta tanto la tasa de pérdida de tramas como el ancho de banda del enlace. Esto también lo hace la métrica ETT (Expected Transmission Time), sin embargo, Airtime también tiene en cuenta la sobrecarga del canal de acceso y de protocolo. La métrica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_a = \left[ O + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{pt}}$$

Donde  $O$  es la constante que cuantifica la sobrecarga del canal de acceso y del protocolo de nivel de enlace.  $B_t$  es la longitud de la trama de prueba en bits,  $r$  es la tasa de transmisión en Mbps y  $e_{pt}$  es la tasa de pérdida de las tramas de prueba.

Los nodos monitorizan y prueban continuamente sus enlaces para mantener la métrica actualizada con el actual estado de la red, y en ambos modos ya indicados, son los nodos destinos los que calculan la ruta óptima hacia un nodo origen. La diferencia entre ambos modos es que en el modo reactivo, es el nodo origen quien inunda la red para solicitar la ruta al nodo destino, mientras que en el modo proactivo, el nodo origen pregunta directamente a un nodo “root” que conoce la situación exacta del nodo destino ahorrando retransmisiones de paquetes por la red.

**AWPP** (Adaptive Wireless Path Protocol de Cisco)

Se trata de un protocolo propietario de Cisco específicamente diseñado para redes malladas. Descubre dinámicamente los nodos vecinos y calcula la calidad de todos los posibles caminos hacia un determinado gateway. La especificación del protocolo está definida en el grupo de trabajo de 802.11s.

**1.2.PROBLEMÁTICA DE LAS REDES MALLADAS**

De forma general, podemos reducir las ventajas de las redes malladas a:

- Permiten desplegar redes rápidamente y de forma automática, reduciendo bastante los costes de conexión de la red con otros sistemas autónomos (backhaul de bajo coste)
- Dan acceso fácilmente en áreas donde las redes fijas son costosas o imposibles, incluyendo zonas aisladas sin línea de vista
- Son escalables y resistentes a cambios de topología y caídas de enlaces
- Capacidad de dar gran cobertura con pocos nodos debido al encaminamiento multi-salto y garantizan una alta disponibilidad a los servicios ofrecidos por la red gracias al alto número de conexiones redundantes.

Las ventajas antes mencionadas se pueden obtener a costa de una mayor complejidad. Asimismo, se introducen retardos adicionales provocados por los múltiples saltos, debido al tiempo de procesamiento de cada nodo. Por otro lado, el *throughput* o velocidad de transmisión disponible también se ve afectado por estos múltiples saltos. Cuantos más saltos, mas nodos activos existen en un mismo canal inalámbrico. Esto provocará mayores colisiones

debido a que el espectro estará compartido por más nodos, y se traducirá en una reducción de velocidad de transmisión.

En general, para  $N+1$  nodos compartiendo el mismo medio inalámbrico (misma área de cobertura), se observa una velocidad de transmisión determinada por:

$$ThroughputEfectivo = \frac{ThroughputMax}{N}$$

Donde *ThroughputMax* es la velocidad máxima disponible en un enlace de 1 salto, sin ningún otro nodo en el medio. Por ese motivo generalmente, en un mismo medio, mayores velocidades se obtendrán en enlaces con pocos saltos, mientras que la menor velocidad se obtendrá en una ruta en cascada con todos los nodos activos en la misma área de cobertura.

Adicionalmente, para el caso de los protocolos, mallados proactivos, la velocidad de transmisión se ve afectada también debido la continua transmisión de mensajes de control hacia el medio. Esta reducción a causa de los mensajes de protocolo puede ser mínima en redes pequeñas, pero siempre será significativa en redes grandes con un elevado número de nodos.

### 1.3. IMPLEMENTACIÓN DE REDES MALLADAS

Existen en la actualidad varias distribuciones de software libre, generalmente basadas en OpenWRT o DD-WRT, que integran paquetes software así como los módulos correspondientes a los protocolos de enrutamiento para redes malladas, facilitando la labor de instalación y configuración al usuario. Entre ellas se pueden mencionar Commotion (basada en OLSR para algunos dispositivos Ubiquiti), Freifunk (basada en OLSR para algunos dispositivos Linksys), R.O.B.I.N. (basada en OLSR o B.A.T.M.A.N. para dispositivos Ubiquiti, D-Link y otros) que funcionan con OpenWRT. En realidad es posible incorporar cualquier soporte para redes malladas sobre un sistema con OpenWRT, sin embargo es la alternativa más compleja y demandante en tiempo.

#### 1.3.1. IMPLEMENTACIÓN COMMOTION

Commotion Wireless es una de las distribuciones para redes malladas más intuitivas y sencillas. Debido a que la mayor parte de dispositivos inalámbricos están preparados para conectarse a través de redes del tipo infraestructura, utilizando puntos de acceso, la distribución Commotion lo contempla permitiendo que los radios se comporten también como puntos de acceso. Una vez que se hayan configurado correctamente los radios, es posible hallar los puntos de acceso Commotion en la lista de redes inalámbricas detectadas por el sistema operativo. Su nombre por defecto tiene la estructura "commotion-ap\_###\_###\_###", tal como es mostrado en la figura 1. Las direcciones IP son asignadas dinámicamente por los radios a través del uso del protocolo DHCP según un rango de direccionamiento propio de cada nodo.

También es posible observar una conexión encriptada al access point conectándonos a una red con un nombre como "commotion-secure\_###\_###\_###".

Para generar una dirección IPv4 para la interfaz de red mallada de sus nodos de forma que sea prácticamente única, Commotion usa la dirección MAC del nodo. Se construye de la siguiente forma "5.m4.m5.m6" con máscara 255.0.0.0, donde m4, m5 y m6 son los bytes 4,5

y 6 de la dirección MAC. Para las interfaces ap inalámbricas se usan las direcciones 101.m5.m6.0/24 y mediante DHCP se asignan a los nodos direcciones en el rango de 101.m5.m6.[2-252]. Para el caso de las subredes cableadas se usan las direcciones 102.m5.m6.0/24 y se asignan a los nodos direcciones en el rango de 102.m5.m6.[2-252]. Para conectar los nodos clientes a Internet, Commotion hace uso del plugin `olsrd_dyn_gw.so.0.5`, el cual detecta automáticamente conectividad a internet, y difunde los HNA hacia los nodos de la red.

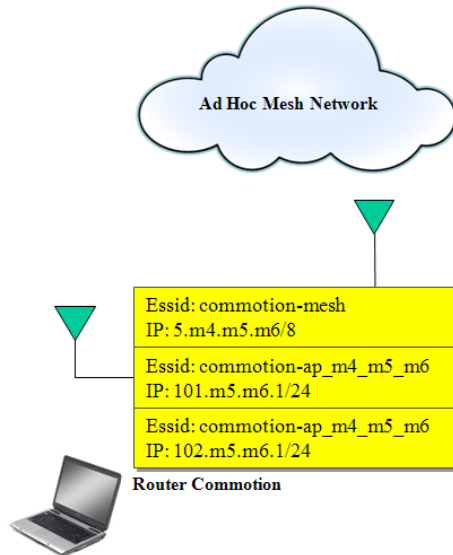


Figura 1. Tipos de direcciones IP asociadas a dispositivos conformantes de la red mallada

Si una de las radios está conectada a Internet (a través de uno de los puertos cableados), las otras la utilizarán para salir a Internet.

#### 1.4. REDES MALLADAS EN EL MUNDO

Existen muchos proyectos de implementación de redes malladas, en zonas aisladas generalmente, en diferentes partes del mundo. Entre las más importantes se pueden mencionar las siguientes.

##### 1.4.1. Village Telco

El proyecto Village Telco es una iniciativa para construir una red comunitaria inalámbrica de bajo coste que dé servicio telefónico y, opcionalmente, acceso a Internet en áreas rurales o aisladas. Se basa en un conjunto de software y hardware específico con el que se puede configurar de forma fácil y rápida una red comunitaria mallada en cualquier parte del mundo con unos requisitos mínimos de energía. Los equipos de radio utilizados tienen la denominación de Mesh Potato, que es un dispositivo plug-and-play con capacidad de encaminamiento y cuenta con una interfaz ATA para comunicaciones de VoIP que hacen uso de teléfonos analógicos convencionales. La configuración de la red es automática y se comporta de manera flexible ante cambios de topología y movimiento de los nodos. El protocolo mallado usado es Batman-Adv, la versión de nivel 2 de B.A.T.M.A.N.

Village Telco surgió debido a la necesidad de millones de personas de tener un acceso a las comunicaciones, ya sean locales o a Internet de forma barata en lugares poco accesibles o aislados, como lo son las zonas rurales en los países pobres.



#### 1.4.2. Freifunk

Freifunk.net es una de las redes comunitarias más antiguas y con mayor experiencia en el mundo. Se trata de una red comunitaria sin ánimo de lucro que da soporte a redes inalámbricas libres en regiones de Alemania. Freifunk es parte de un movimiento internacional para redes inalámbricas abiertas, que actualmente cuenta con un amplio apoyo en muchos países, incluidos países pobres y en vías de desarrollo (Freifunk ha participado activamente en el desarrollo del proyecto Village Telco). Freifunk ofrece la facilidad de instalar el software necesario para la interconexión de redes malladas mediante un *firmware* adaptado al cliente basado en OpenWRT. Se puede considerar a Freifunk como la precursora de las redes comunitarias libres. Usa el protocolo OLSR, aunque hay regiones funcionando con B.A.T.M.A.N.

#### 1.4.3. Guifi.net

Guifi.net es una red de telecomunicaciones desarrollada en España. Es abierta, libre y neutral. Se vertebra a partir de un acuerdo de interconexión en el que cada participante al conectarse a la red, la extiende también. Los usuarios de Guifi.net son particulares, empresas y administraciones que construyen una red de telecomunicaciones ciudadana, esto es, una red que es propiedad de todos los que forman parte de ella y no depende de gobiernos ni ISPs (proveedores de internet). Es una red abierta porque los datos de configuración de la red se publican para que, de esta manera, cualquier persona, empresa o administración pueda ver cómo está construida la red y, por tanto, tenga la capacidad de mejorarla, mantenerla y ampliarla. Es una red libre porque no hay nadie que pueda imponer restricciones. Es una red neutral respecto a los contenidos. Dentro de la red puede circular cualquier contenido que alguien necesite: de interconexión de sedes, acceso a Internet. Guifinet tiene zonas ad-hoc, pero en su mayor parte trabaja en modo infraestructura.

#### 1.4.4. Bogota-mesh

Bogota-mesh es una red inalámbrica cuyo objetivo es servir como plataforma para ayudar a disminuir la brecha digital de los habitantes de Bogotá y así ayudar a la creación de una red independiente, natural, comunitaria, sostenible y autónoma, donde los proyectos personales, educativos, culturales y sociales tengan acogida y se puedan difundir de manera libre por la red; sin restricciones de ningún tipo, sin depender de entidades donde se filtra y se restringe la información y sin los actuales límites que se encuentran en Internet. Bogotamesh usa una implementación de B.A.T.M.A.N. a nivel 3 de la comunidad argentina de Rosario, Lurgo-Mesh, llamada Nightwing, que deriva de *batmand*.

#### 1.4.5. QuintanaLibre

QuintanaLibre es una red comunitaria del pueblo de José de la Quintana, Córdoba, Argentina. La red cuenta con 8 nodos activos, en una población de menos de 1000 habitantes. La penetración de la red ya es importante y el SSID (identificador de red) es visible desde prácticamente todo el pueblo. Trabaja conjuntamente con DeltaLibre, otra red comunitaria Argentina. La red es mallada y utiliza el protocolo batman advanced para su enrutamiento dinámico.

Al igual que Guifi.net no es puramente ad-hoc ya que algunos de los enlaces son en modo infraestructura, pero su carácter se orienta a topologías malladas. Algunos parámetros fundamentales tenidos en cuenta en su diseño fueron la utilización de equipos y materiales de bajo costo, así como la replicabilidad de la experiencia.



## 2. PARTE PRÁCTICA:

### 2.1. INSTALACIÓN DE COMMOTION EN RADIOS UBIQUITI NANOSTATION M5 Y USO INICIAL DE LA INTERFAZ GRÁFICA

#### Paso 1:

Realice las conexiones mostradas en la figura 2.

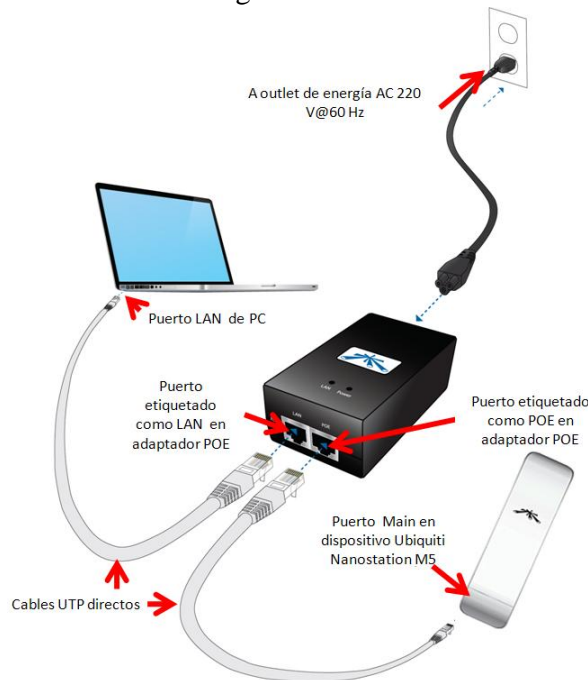


Figura 2. Conexión de radio Ubiquiti con PC (adaptado de datasheet)

#### Paso 2:

Descargue el archivo correspondiente a la distribución Commotion para la radio Nanostation M5 del sitio web <https://code.commotionwireless.net/projects/commotion/files> (Figura 3).

### Ficheros

Fichero	Fecha	Tamaño	D/L	MD5
<b>Nightly Builds</b>				
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-bullet-m-squashfs-factory.bin		4,1 MB	91	5497308081fe5be5ea33132e08602f0b
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-bullet-m-squashfs-sysupgrade.bin		4,1 MB	49	986c7c555028a687a2bc0a99211a05af
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin	2012-10-17 02:00	4,1 MB	57	842a009fef069cb07217c0eacc3a3017c
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-nano-m-squashfs-sysupgrade.bin	2012-10-17 02:00	4,1 MB	28	a45447136fef415c1c5f855442a61ff6
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-rocket-m-squashfs-factory.bin	2012-10-17 02:00	4,1 MB	31	ae1372ce647a7ebf08beb7feee571255
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-rocket-m-squashfs-sysupgrade.bin	2012-10-17 02:00	4,1 MB	27	ae8a33f8933ab1835c3af3a1585a0f37
<b>Developer Pre-Release (PR3)</b>				
CommotionMeshTether-pr3.apk	2012-09-17 02:36	1 MB	77	a80f078b6150aa1cb4d06e79a134eea
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-bullet-m-squashfs-factory.bin	2012-09-17 02:36	4,1 MB	30	59a773a7a5b3da998756a0063a2892507
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-bullet-m-squashfs-sysupgrade.bin	2012-09-17 02:36	4,1 MB	15	364428ff60cfa6a3b02229b0e09180b
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-nano-m-squashfs-factory.bin	2012-09-17 02:36	4,1 MB	21	8b4fe02626daaac477e153080740192a
openwrt-ar71xx-generic-ubnt-nano-m-squashfs-sysupgrade.bin	2012-09-17 02:36	4,1 MB	20	1cef827607c9cf31980f3ca090348a04c

Figura 3. Lista de imágenes de Commotion para radios Ubiquiti

**Paso 3:**

Se utilizará el cliente TFTP de Windows XP o se le habilitará en caso de contar con Windows 7 (*Panel de Control, Programas y Características, Activar o Desactivar las Características de Windows, Cliente TFTP, Aceptar*). Verifique que el sistema reconoce el comando *tftp* en el intérprete de comandos.

**Paso 4:**

Por defecto, las radios Ubiquiti tienen la IP 192.168.1.20 (de fábrica). Configure la interfaz cableada de la computadora con la IP 192.168.1.X/24. En donde X corresponde al identificador del grupo (1, 2, 3, 4, 6 ó 7).

**Paso 5:**

Realice la siguiente secuencia de pasos para que la radio ingrese a su modo TFTP:

- Apagar la radio si es que estuviese encendida
- Presionar el botón reset de la unidad
- Encender la radio manteniendo presionado el botón reset
- Mantenga presionado el botón reset por alrededor de 20 segundos (leds parpadeando)
- Deje de presionar el botón de reset y verifique conectividad haciendo un ping a 192.168.1.20.

**Paso 6:**

A continuación transfiera el archivo imagen a la radio a través de la siguiente línea de comandos en una consola de Windows.

```
tftp -i 192.168.1.20 put openwrtxxx.factory.bin flash_update
```

Luego de unos pocos segundos se obtendrá una respuesta satisfactoria indicando la transferencia correcta del archivo (Figura 4). Esperar aproximadamente 10 minutos para continuar (o hasta que se publiquen las redes de los *access points*).

```
C:\Documents and Settings\marco\Escritorio>tftp -i 192.168.1.20 put openwrt-ar71  
xx-generic-ubnt-rocket-m-squashfs-factory.bin flash_update  
Transferencia terminada: 4325788 bytes en 4 segundos, 1081447 bytes/s  
C:\Documents and Settings\marco\Escritorio>_
```

Figura 4. Transferencia satisfactoria de archivo a radio

¿Tiene alguna observación acerca del proceso de instalación de firmware en las radios?

.....

.....

.....

.....

**Paso 7:**

Acceder a la interfaz web (usando Firefox) para realizar la configuración de la radio escribiendo la dirección IP 192.168.1.20 en la barra de direcciones de un navegador web, tal como se muestra en la Figura 6. Luego de realizar los pasos anteriores será posible ver los SSIDs (identificadores de red) emitidos por las radios pertenecientes a la red mallada (si es que las tarjetas inalámbricas operaran en la banda 5.8 GHz) tal como es mostrado en la Figura 5.

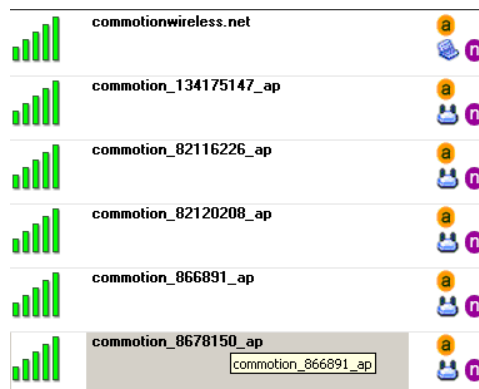


Figura 5. SSIDs emitidos por las radios (Aparece temporalmente una red inalámbrica Commotion-setup)

¿Qué diferencia existe entre la red commotionwireless.net y aquellas con denominación commotion\_abcdefgh\_ap?

.....

.....

**Paso 8:**

Establecer una contraseña para habilitar la configuración de la radio a través de SSH, por medio de un intérprete de comandos (Figura 6).



Figura 6. Interfaz web de configuración de radio nanostation M5

**Nota 1:**

**CONFIGURACIÓN DE RADIO A TRAVÉS DE INTERFAZ DE CONSOLA**

Para la configuración de la radio a través de SSH, ejecute un cliente SSH en la computadora. Putty en nuestro caso. Acceda a la radio a utilizando el usuario y contraseña antes definidos. La pantalla de bienvenida es mostrada en la figura 7.



Figura 7. Acceso a la radio a través del uso de putty

**Paso 9:**

Para ver la topología de la malla con sus nodos, seguimos la siguiente ruta por medio de la interfaz Web: *Status*, *OLSR* y seleccionamos la opción *OLSR-Viz* (por defecto las radios trabajan en el canal 36 (5.180 GHz) y a una potencia de 17 dBm (50 mW). Por lo que inicialmente todas las radios se verán como se muestra en el diagrama de topología mostrado en la figura 8.

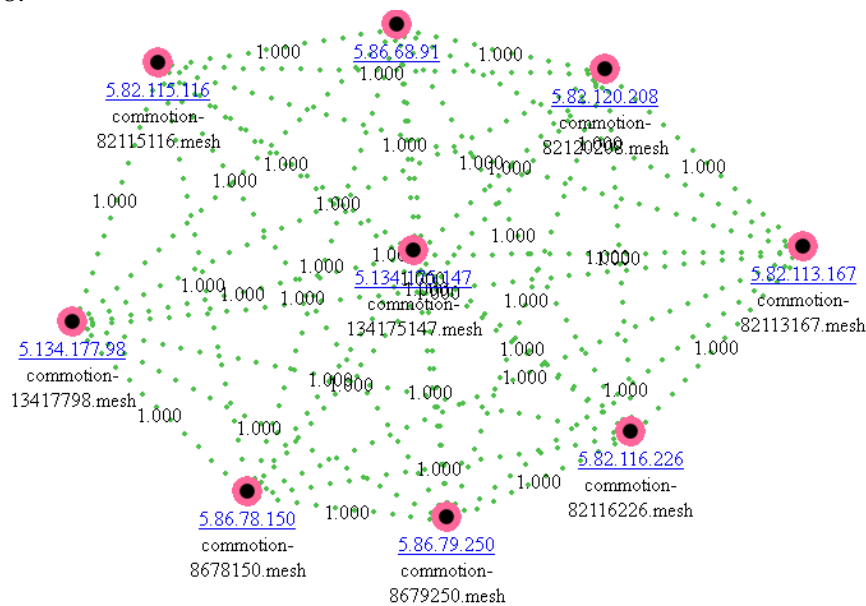


Figura 8. Topología inicialmente mostrada

¿Qué significan los números asociados a los enlaces? ¿Cómo se calculan?

.....

.....

.....

.....

### Paso 10:

#### Configuración de radio:

A continuación configuraremos la potencia de transmisión así como algunos aspectos relacionados al estándar IEEE802.11n.

Para ello vaya a:

*Network/Wifi*



Figura 9. Ruta para la edición de parámetros de radio

Setearemos la potencia de transmisión de la radio a 5 dBm. Esto considerando una pérdida de trayectoria de 81 dB a 50 metros. Haga uso de los anexos presentados al final de este documento para realizar estimaciones del nivel de potencia recibido para la distancia considerada.

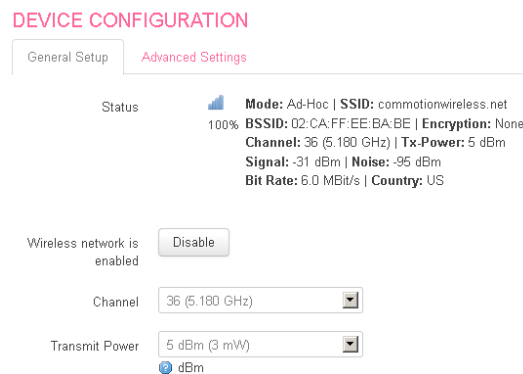


Figura 10. Edición de la potencia de transmisión y canal utilizado

Cuando va a la pestaña *Advanced Settings* podrá modificar parámetros de transmisión OFDM. Para efectos de laboratorio, dejamos los valores por defecto, tal como es mostrado a continuación:

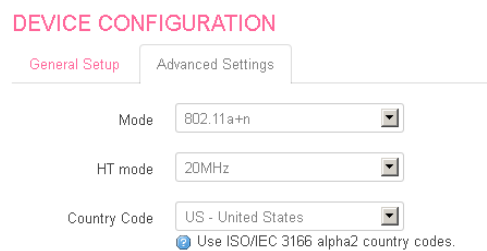


Figura 11. Edición de parámetros relacionados con IEEE802.11n

Salve y aplique. Espere a que se reinicien los servicios, sea paciente.

**Nota 2 (informativa):**

El archivo que contiene los parámetros de radio (potencia de transmisión, canal utilizado, channel bonding, etc.) es `/etc/config/wireless`

**Paso 11:**

**Configuración de seguridad de acceso al access point asociado a cada radio:**

Aprovecharemos este momento para establecer contraseñas para que únicamente los usuarios autorizados puedan acceder al *access point*. Para ello vaya a *Network/Wifi* y edite el *access point*. Tal como es mostrado a continuación.

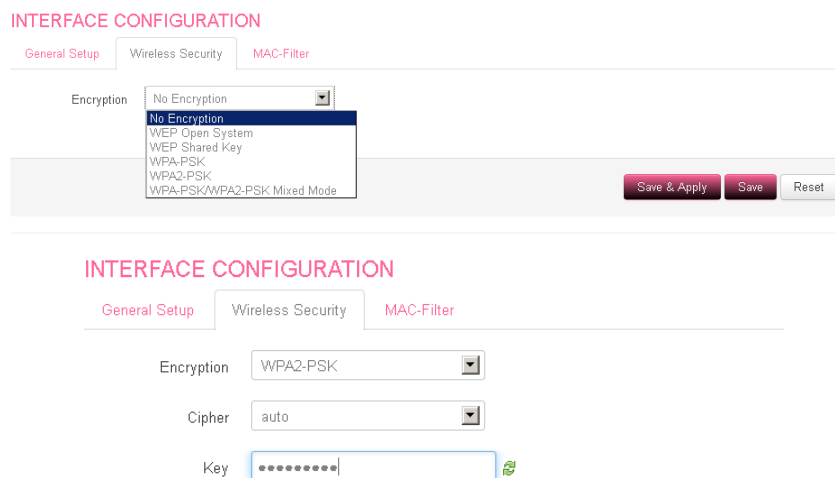


Figura 12. Configuración de acceso a access point emitida por las radios

Puede observar los usuarios conectados a la radio siguiendo la ruta *Status/Overview*

DHCP LEASES

Hostname	IPv4-Address	MAC-Address	Leasetime remaining
ATAR-PC	101.115.116.126	00:22:fa:e2:db:58	11h 39m 47s
casa	101.115.116.24	00:16:ea:53:86:04	11h 39m 7s
lbodero	102.115.116.88	00:c0:9f:ca:7a:b2	11h 36m 22s

Figura 13. Usuarios conectados a la radio

**Paso 12:**

**Configuración inalámbrica:**

Si se desea, se puede modificar el *hostname* (*System/System*) y aplicamos los cambios. Este valor es el que se mostrará delante del prompt cuando se haga un acceso por consola a través de SSH por ejemplo.

Cambiamos el Mesh SSID y el Mesh BSSID de cada antena para renombrar la malla y sus nodos. Para ello, vamos a *Commotion/Mesh Configuration (Manual)*

Base-name

The one-word name of the network, used to create SSIDs and hostnames.

Mesh SSID

The backhaul SSID of the mesh network.

Mesh BSSID

The backhaul BSSID of the mesh network, must be statically set for ad-hoc Wi-Fi.

Figura14. Configuración de SSID y BSSID a través de interfaz Web

Y modificamos los valores del SSID y BSSID correspondientes. El BSSID (Basic Service Set Identification) es el identificador de BSS de 6 octetos. El BSS (Basic Service Set) es conjunto de equipos que forman una determinada LAN inalámbrica 802.11. Mediante el identificador BSSID podemos asignar en que red trabaja cada equipo. Para el caso de Commotion, la propia distribución genera un BSSID cualquiera, pero el usuario es libre de poner el que desee, siempre que no sea el mismo que el de las redes de su entorno.

Adicionalmente es conveniente cambiar el nombre de la antena para trabajar de manera más cómoda. Para ello modificamos el campo *Base-name* de acuerdo a la tabla 1, e introducimos el nombre para el nodo.

Aplicamos y salvamos. Esto puede demorar algunos minutos.

Reiniciar las radios para que los nombres configurados se actualicen en la página web.

Tabla 1. Direccionamiento IP de las radios utilizadas en laboratorio

Denominación de antena (Base-name)	Grupo	Dirección IP de radio en red mallada	Malla (Mesh SSID)	Mesh BSSID	Hostname
nodo1	1	5.86.79.250 /8	labtic	02:CA:FF:EE:BA:BE	nodo1-INICTEL
nodo2	2	5.82.113.167 /8	labtic	02:CA:FF:EE:BA:BE	nodo2-INICTEL
nodo3	3	5.82.115.116 /8	labtic	02:CA:FF:EE:BA:BE	nodo3-INICTEL
nodo4	4	5.82.120.208 /8	labtic	02:CA:FF:EE:BA:BE	nodo4-INICTEL
nodo6	6	5.86.78.150 /8	labtic	02:CA:FF:EE:BA:BE	nodo6-INICTEL
nodo7	7	5.82.116.226 /8	labtic	02:CA:FF:EE:BA:BE	nodo7-INICTEL

### Paso 13:

Desactive el firewall, para ello, abra una sesión de consola con SSH y escriba `/etc/init.d/firewall stop`

Para que los cambios sean permanentes escribir dicho comando en *System/Startup*

#### Local Startup

This is the content of `/etc/rc.local`. Insert your own commands here (in front of `'exit 0'`) to execute them at the end of the boot process.

```
# Put your custom commands here that should be executed once
# the system init finished. By default this file does nothing.
/etc/init.d/firewall stop
exit 0
```

Figura 15. Sección en la que se escriben los comandos a ejecutarse cuando se inicia la radio

### Paso 14:

Configure la tarjeta de red cableada en modo DHCP y verifique la dirección IP asignada y el *gateway* con el comando `ipconfig`. Consulte a los otros grupos las direcciones que les fueron asignadas y verifique conectividad con el comando `ping`.

Trate de realizar lo mismo de manera inalámbrica (si la tarjeta de red lo soporta)

Escriba la IP asignada, la máscara correspondiente y el *gateway* obtenidos.

.....  
.....

## 2.2.USO DE APLICATIVOS EN LA RED MALLADA

### Paso 15:

Ahora verificaremos la utilidad de la red mallada en un esquema ad hoc estableciendo sesiones de videoconferencia entre los diferentes nodos de la red. El software utilizado será Polycom PVX v8.0.2. Para ello es necesario que se agrupen los grupos en pares.

Luego de instalar el software ejecute el asistente de configuración para indicarle al software el origen del video que será enviado así como las interfaces de la tarjeta de sonido y dirección IP. Esto se muestra en la figura 16.

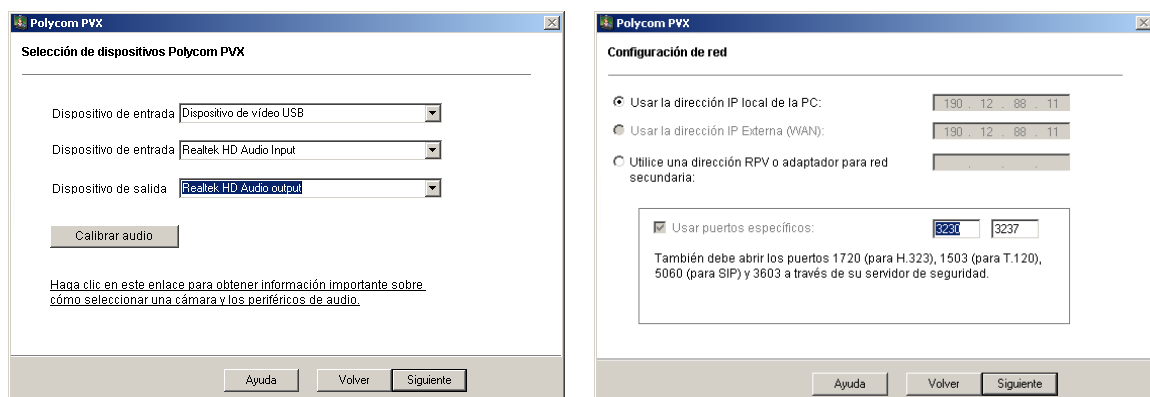


Figura 16. Configuración de entrada/salida de audio y origen de video



En la barra de direcciones introduzca la dirección IP de la computadora del usuario con el que quiere establecer conexión (su par) tal como es mostrado en la parte izquierda de la figura 17 y haga *click* en llamar. El usuario remoto recibirá un mensaje para contestar la llamada. Esto es mostrado en la parte derecha de la figura 17. Debido a que se está usando una versión de evaluación, sólo se podrá realizar una llamada durante cinco minutos.



Figura 17. Inicio de conexión y mensaje remoto

¿Diría Ud. que la sesión de videoconferencia ofrecida tiene calidad en la comunicación? Si su respuesta es no, especifique los motivos (presencia de fuerte retardo, la variación del retardo, el numero de paquetes perdidos). ¿Esto puede ser ocasionado por un alto consumo simultáneo de ancho de banda?

.....

.....

.....

.....

.....

**Paso 16:**  
**Pruebas de rendimiento de red mallada implementada con OLSRD**

Se hará uso de un software generador de tráfico para hallar el throughput que permite obtener los enlaces actualmente establecidos. El software elegido es Iperf.

Para ello, los grupos trabajarán en pares, tal como antes.  
Uno de los grupos del par ejecutará el software Iperf como servidor, así:

```
iperf -s
```



El otro ejecutará el software Iperf como cliente

```
iperf -c dirección_IP_del_servidor
```

¿Qué valor de *throughput* se obtiene?

.....  
.....

Intercambie roles y realice las mismas pruebas

¿Qué valor de *throughput* se obtiene?

.....  
.....

**Observaciones del alumno:**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## Apéndice E

### Datasheet Ubiquiti Nanostation M5



## NanoStation M5: 5GHz Hi Power 2x2 MIMO AirMax TDMA Station

The Most Powerful NanoStation Ever.

**airMAX**  
MIMO TDMA Protocol



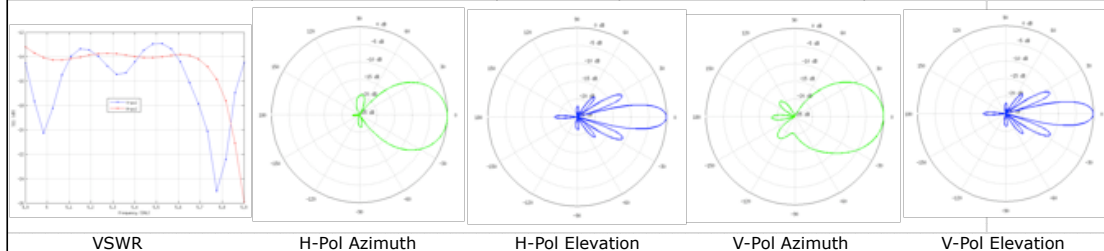
SYSTEM INFORMATION	
Processor Specs	Atheros MIPS 24KC, 400MHz
Memory Information	32MB SDRAM, 8MB Flash
Networking Interface	2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet Interface

REGULATORY / COMPLIANCE INFORMATION	
Wireless Approvals	FCC Part 15.247, IC RS210, CE
RoHS Compliance	YES

OPERATING FREQUENCY 5470MHz-5825MHz							
5GHz TX POWER SPECIFICATIONS				5GHz RX SPECIFICATIONS			
	DataRate	Avg. TX	Tolerance		DataRate	Sensitivity	Tolerance
11a	6-24Mbps	27 dBm	+/-2dB	11a	6-24Mbps	-94 dBm min.	+/-2dB
	36Mbps	25 dBm	+/-2dB		36Mbps	-80 dBm	+/-2dB
	48Mbps	23 dBm	+/-2dB		48Mbps	-77 dBm	+/-2dB
	54Mbps	22 dBm	+/-2dB		54Mbps	-75 dBm	+/-2dB
5GHz 11n	MCS0	27 dBm	+/-2dB	5GHz 11n	MCS0	-96 dBm	+/-2dB
	MCS1	27 dBm	+/-2dB		MCS1	-95 dBm	+/-2dB
	MCS2	27 dBm	+/-2dB		MCS2	-92 dBm	+/-2dB
	MCS3	27 dBm	+/-2dB		MCS3	-90 dBm	+/-2dB
	MCS4	26 dBm	+/-2dB		MCS4	-86 dBm	+/-2dB
	MCS5	24 dBm	+/-2dB		MCS5	-83 dBm	+/-2dB
	MCS6	22 dBm	+/-2dB		MCS6	-77 dBm	+/-2dB
	MCS7	21 dBm	+/-2dB		MCS7	-74 dBm	+/-2dB
	MCS8	27 dBm	+/-2dB		MCS8	-95 dBm	+/-2dB
	MCS9	27 dBm	+/-2dB		MCS9	-93 dBm	+/-2dB
	MCS10	27 dBm	+/-2dB		MCS10	-90 dBm	+/-2dB
	MCS11	27 dBm	+/-2dB		MCS11	-87 dBm	+/-2dB
	MCS12	26 dBm	+/-2dB		MCS12	-84 dBm	+/-2dB
	MCS13	24 dBm	+/-2dB		MCS13	-79 dBm	+/-2dB
	MCS14	22 dBm	+/-2dB		MCS14	-78 dBm	+/-2dB
MCS15	21 dBm	+/-2dB	MCS15	-75 dBm	+/-2dB		

PHYSICAL / ELECTRICAL / ENVIRONMENTAL	
Enclosure Size	29.4 cm x 8 cm x 3cm
Weight	0.4kg
Enclosure Characteristics	Outdoor UV Stabilized Plastic
Mounting Kit	Pole Mounting Kit included
Max Power Consumption	8 Watts
Power Supply	15V, 0.8A surge portection integrated POE adapter included
Power Method	Passive Power over Ethernet (pairs 4,5+; 7,8 return)
Operating Temperature	-30C to +80C
Operating Humidity	5 to 95% Condensing
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4

INTEGRATED 2x2 MIMO ANTENNA			
Frequency Range	4.9-5.9 GHz	Max VSWR	1.6:1
Gain	14.6-16.1dBi	H-pol Beamwidth	43 deg.
Polarization	Dual Linear	V-pol Beamwidth	41 deg.
Cross-pol Isolation	22dB minimum	Elevation Beamwidth	15 deg.



**802.11n / Airmax Support Only at this Time. 802.11a support expected with AirOS 5.1 Release by end of Year**



# Apéndice F

## Scripts y ficheros de interés

### testbench1.sh

Este script se ha usado para automatizar las pruebas de rendimiento de la red. Como parámetro se le pasa una dirección IP y los resultados de los *ping* y de los *iperf* se guardan en un fichero que se guardará en el directorio donde se ejecuta el script.

```
#!/bin/sh

if [ "$1" = "" ]
then
echo "USAGE!: sh testbench.sh <dirIP>"
else
touch performance_to_$1
echo "\n-----PING-----" >> performance_to_$1
date >> performance_to_$1
echo "-----" >> performance_to_$1
ping $1 -c 20 >> performance_to_$1

echo "\n-----IPERF-----" >> performance_to_$1
date >> performance_to_$1
echo "-----" >> performance_to_$1
for i in 1 2 3 4 5 ; do
echo "\n-----" >> performance_to_$1
date >> performance_to_$1
echo "-----" >> performance_to_$1
iperf -c $1 --udp -l 1024 -b 200mb >> performance_to_$1
sleep 3
done
fi
```

## topology.sh

Este script tiene la función de permitir una visualización de la topología de una red mesh. Funciona tanto para redes con Batman-adv como para redes con 802.11s

Para su correcto funcionamiento, es necesario un archivo *hosts*, donde se listen las direcciones IP de los nodos de la red. También es necesario que en los nodos, la contraseña del usuario *root* sea conocida y siempre la misma en todos los nodos.

El script se conecta a cada nodo listado en el archivo *hosts*, y obtiene información sobre los nodos vecinos de cada nodo. Posteriormente utiliza dicha información para generar una imagen en formato *png* para mostrar la topología de la red mallada.

```
#!/bin/bash

filehost=/home/emunicio/hosts #<-- add path of hosts file
USER="root"
PASS="rootkonklave" #<--- add password of root account

echo "" > /tmp/datos
echo "" > /tmp/filetmp
echo "" > /tmp/filetmp2

cat $filehost |
while read dirip
do
res='ping $dirip -c 5 | grep ttl '
if [ "$res" != "" ]
then

HOST=$dirip
CMD="iw meshif station dump && ifconfig"
VAR=$(expect -c "
spawn ssh -o StrictHostKeyChecking=no $USER@$HOST $CMD
match_max 100000
expect \"*?assword:*\"
send -- \"$PASS\r\"
send -- \"\r\"
expect eof
")

peers="'echo "$VAR" | grep Station | \
awk '{print $2}'"
```



```
macpropia="'echo "$VAR" | grep br0mesh | \  
awk '{print $5}' | tr [:upper:] [:lower:]'"  
  
echo "$macpropia" >> filetmp2  
  
while read mac #leemos linea a linea la salida  
do  
repetida='cat filetmp2 | grep $mac'  
if [ "$repetida" = "" ]  
then  
echo "enlace no repetido a\u00f1ado:$macpropia -> $mac"  
echo "\"$macpropia\" -- \"$mac\" [color=blue]" \  
>> filetmp  
else  
echo "enlace repetido $macpropia -> $mac"  
fi  
done  
else  
echo "$dirip is not reachable"  
fi  
done  
  
echo "graph g{  
rankdir = LR;" > datos  
cat filetmp | sed '/ssh/d' | sed '/password/d' | sort -u >> datos  
  
echo "}" >> datos  
cat datos | dot -Tpng > topologia.png  
rm /tmp/filetmp  
rm /tmp/filetmp2  
rm /tmp/datos
```

## Makefile para compilar código de Batman-adv para OpenWRT

Este ha sido el Makefile usado para compilar código Batman-adv contra un kernel de OpenWRT. Si se quiere hacer uso de este Makefile el usuario ha de cambiar el directorio fuente donde reside el código en el apartado *Build/Prepare* del Makefile

```
#
# Copyright (C) 2010 OpenWrt.org
#
# This is free software, licensed under the GNU GPLv2.
# $Id: Makefile 5624 2006-11-23 00:29:07Z nbd $

include $(TOPDIR)/rules.mk

PKG_NAME:=batman-adv

PKG_BATMAN_REV:=c3c748339f605c034bac3317a93e10fc0f8d1d0a
PKG_BATCTL_REV:=3e88396b24c65bc438be54e80f930a728ab5c65b

PKG_BATMAN_BRANCH:=$(subst ",,,$(CONFIG_KMOD_BATMAN\
_ADV_BRANCH_NAME))
PKG_BATMAN_SHORTREV:=$(shell echo $(PKG_BATMAN_REV) \
| cut -c1-7)
PKG_BATMAN_FNAME:=batman-adv-\
$(PKG_BATMAN_BRANCH)\
-$(PKG_BATMAN_SHORTREV).tar.gz
PKG_BATMAN_DIR:=batman-adv-$(PKG_BATMAN_SHORTREV)
PKG_BATCTL_SHORTREV:=$(shell echo $(PKG_BATCTL_REV)
| cut -c1-7)
PKG_BATCTL_FNAME:=batctl-$(PKG_BATCTL_SHORTREV).tar.gz
PKG_BATCTL_DIR:=batctl-$(PKG_BATCTL_SHORTREV)
#no se descarga
#PKG_SOURCE_URL:=http://git.open-mesh.org/snapshot/
PKG_SOURCE:=$(PKG_BATMAN_FNAME)

PKG_BUILD_DIR:=$(BUILD_DIR)/$(PKG_NAME)/$(PKG_BATMAN_DIR)
PKG_BATCTL_BUILD_DIR:=$(BUILD_DIR)/$(PKG_NAME)\
/$(PKG_BATCTL_DIR)

include $(INCLUDE_DIR)/package.mk
include $(INCLUDE_DIR)/kernel.mk
```

```

define KernelPackage/batman-adv
    URL:=http://www.open-mesh.org/
    MAINTAINER:=Marek Lindner <lindner_marek@yahoo.de>
    SUBMENU:=Network Support
    DEPENDS:=+kmod-lib-crc16 +libc
    TITLE:=B.A.T.M.A.N. Adv
    FILES:=$(PKG_BUILD_DIR)/batman-adv.$(LINUX_KMOD_SUFFIX)
    AUTOLOAD:=$(call AutoLoad,50,batman-adv)
endef

define KernelPackage/batman-adv/description
B.A.T.M.A.N. advanced is a kernel module which allows to
build layer 2 mesh networks. This package builds the latest
development version ($(PKG_BATMAN_SHORTREV)) of the kernel
\module plus
its user space configuration & managerment tool batctl.
endef

define KernelPackage/batman-adv/config
source "$(SOURCE)/Config.in"
endef

MAKE_BATMAN_ADV_ARGS += \
CROSS_COMPILE="$(TARGET_CROSS)" \
KERNELPATH="$(LINUX_DIR)" \
ARCH="$(LINUX_KARCH)" \
PATH="$(TARGET_PATH)" \
SUBDIRS="$(PKG_BUILD_DIR)" \
PWD="$(PKG_BUILD_DIR)" \
LINUX_VERSION="$(LINUX_VERSION)" \
CONFIG_BATMAN_ADV_DEBUG=$(if $(CONFIG_KMOD_BATMAN_ADV_DEBUG_LOG),y,n) \
CONFIG_BATMAN_ADV_BLA=$(if $(CONFIG_KMOD_BATMAN\
_ADV_BLA),y,n)
REVISION="$(PKG_BATMAN_BRANCH)-$(PKG_\
BATMAN_SHORTREV)" all

MAKE_BATCTL_ARGS += \
CFLAGS="$(TARGET_CFLAGS)" \
CCFLAGS="$(TARGET_CFLAGS)" \
OFLAGS="$(TARGET_CFLAGS)" \
REVISION="$(PKG_BATCTL_SHORTREV)" \
CC="$(TARGET_CC)" \
NODEBUG=1 \

```

```

UNAME="Linux" \
DESTDIR="$(PKG_INSTALL_DIR)" \
STRIP="/bin/true" \
batctl install

ifneq ($(DEVELOPER)$(CONFIG_KMOD_BATMAN_ADV_BATCTL),)
define Download/batctl
    FILE:=$(PKG_BATCTL_FNAME)
    URL:=$(PKG_SOURCE_URL)
endif
#$(eval $(call Download,batctl))

BATCTL_EXTRACT = tar xzf "$(DL_DIR)/$(PKG_BATCTL_FNAME)" \
-C "$(BUILD_DIR)/$(PKG_NAME)"
BATCTL_PATCH = $(call Build/DoPatch,\
"$(PKG_BATCTL_BUILD_DIR)","$(PATCH_DIR)","*batctl*")
BATCTL_BUILD = $(MAKE) -C $(PKG_BATCTL_BUILD_DIR) \
$(MAKE_BATCTL_ARGS)
BATCTL_INSTALL = $(INSTALL_BIN)\
$(PKG_INSTALL_DIR)/usr/local/sbin/batctl \
$(1)/usr/sbin/
endif

#Definir aqui la ruta hacia el directorio del codigo
define Build/Prepare
mkdir -p $(PKG_BUILD_DIR)
mkdir -p $(PKG_BATCTL_BUILD_DIR)
$(CP) ~/PFC/batman-adv-2012.4.0/* $(PKG_BUILD_DIR)/
$(CP) ~/PFC/batctl-2012.4.0/* $(PKG_BATCTL_BUILD_DIR)/
$(MAKE) -C "$(PKG_BATCTL_BUILD_DIR)" clean
endif

KPATCH ?= $(PATCH)
define Build/DoPatch
@if [ -d "$(2)" ]; then \
if [ "$$$$ls $(2) | grep -Ec $(3))" -gt 0 ]; then \
$(KPATCH) "$(1)" "$(2)" "$(3)"; \
fi; \
fi
endif

```

---

```
define Build/Patch
$(call Build/DoPatch,"$(PKG_BUILD_DIR)", \
"$(PATCH_DIR)","*batman*")
$(BATCTL_EXTRACT)
$(BATCTL_PATCH)
endif

define Build/Compile
$(MAKE) -C "$(PKG_BUILD_DIR)" $(MAKE_BATMAN_ADV_ARGS) -j2
$(BATCTL_BUILD)
endif

define Build/Clean
rm -rf $(BUILD_DIR)/$(PKG_NAME)/
endif

define KernelPackage/batman-adv/install
$(INSTALL_DIR) $(1)/etc/config $(1)/etc/hotplug.d/net \ $(1)/lib/batman-adv \
$(1)/usr/sbin
$(INSTALL_DATA) ./files/etc/config/batman-adv \
$(1)/etc/config
$(INSTALL_DATA) ./files/lib/batman-adv/config.sh \
$(1)/lib/batman-adv
$(INSTALL_BIN) ./files/etc/hotplug.d/net/99-batman-adv \
$(1)/etc/hotplug.d/net
$(INSTALL_BIN) ./files/usr/sbin/batman-adv \
$(1)/usr/sbin
$(BATCTL_INSTALL)
endif

$(eval $(call KernelPackage,batman-adv))
```



# Bibliografía

- [1] BALLESTERO DIAZ, F (2002). La Brecha Digital: El riesgo de la exclusión en la Sociedad de la Información. Fundación Retevisión. ISBN: 9788493154295
- [2] BANCO MUNDIAL. Crecimiento total de la población y Urbanización. Datos globales y cifras <http://www.bancomundial.org/temas/cities/datos.htm>
- [3] Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación del Gobierno de España. Plan Director de la Cooperación Española 2009-2012 [http://www.aecid.es/es/servicios/publicaciones/Documentos/Plan\\_director/](http://www.aecid.es/es/servicios/publicaciones/Documentos/Plan_director/)
- [4] Ministerio de Economía y Finanzas de la República del Perú. Plan Nacional de Desarrollo Territorial 2004-2013: construyendo el Perú de la Próxima Década [http://www.mef.gob.pe/contenidos/pol\\_econ/documentos/PNDT\\_2004\\_2013.pdf](http://www.mef.gob.pe/contenidos/pol_econ/documentos/PNDT_2004_2013.pdf)
- [5] PNUD. Objetivos de Desarrollo del Milenio <http://www.undp.org/content/undp/es/home/mdgoverview/>
- [6] BANCO MUNDIAL. Población rural por países <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.RUR.TOTL.ZS/countries/1W>
- [7] John A. Flanders, Ryan T. Ross, William D. Townsend. Unicast, multicast, and broadcast method and apparatus. Patent 3Com 1997. Santa Clara, California. <http://www.freepatentsonline.com/6115379.pdf>
- [8] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). IETF RFC 3626. (2003) <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [9] T. Clausen, G. Hansen, L. Christensen and G. Behrmann. The Optimized Link State Routing Protocol, Evaluation through Experiments and Simulation. IEEE Symposium on "Wireless Personal

- Mobile Communications”. (2001) <http://hipercom.inria.fr/olsr/wpmc01.ps>
- [10] Donald B. Johnson. A Note on Dijkstra’s Shortest Path Algorithm. Cornell University, New York (1973) <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=321768>
- [11] Dang Nguyen, Pascale Minet. Scalability of the OLSR Protocol with the Fish Eye Extension. INRIA Rocquencourt, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1260671>
- [12] C. Aichele, M. Lindner, S. Wunderlich. Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking (B.A.T.M.A.N). IETF-Network Working Group. Internet-Draft 2008, <http://tools.ietf.org/html/draft-wunderlich-openmesh-manet-routing-00>
- [13] IEEE. IEEE 802.11s-2012 Standard for Information Technology. 2012. E-ISBN : 978-0-7381-7211-8 <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6178209>
- [14] H. Aoki, S. Takeda, K. Yagyu, A. Yamada. IEEE 802.11s Wireless LAN Mesh Network Technology. Technology Report 2006. <http://sciencelinks.jp/j-east/article/200621/000020062106A0690520.php>
- [15] A. Batiste Troyano. Protocolos de encaminamiento en redes inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental. Universitat Oberta de Catalunya. 2011 <http://hdl.handle.net/10609/8164>
- [16] R.G. Garropo, S. Giordano, L. Tavanti. Experimental evaluation of two open source solutions for wireless mesh routing at layer two. Università di Pisa. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1856371>



Creative Commons

