

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**DISEÑO DE UN ESQUEMA CROSS-LAYER PARA EL
BALANCE ENTRE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y CALIDAD DE
SERVICIO EN LA TRANSMISIÓN DE TRÁFICO MULTIMEDIA
EN REDES AD HOC**

TESIS DOCTORAL

Santiago Renán González Martínez

Supervisores:

Dr. Juan Carlos Guerri Cebollada

Dr. Pau Arce Vila

Valencia, España
Marzo 2017

Abstract

This thesis dissertation addresses the problem of energy constraints in ad hoc wireless networks. In this sort of networks nodes are generally powered by means of batteries, which involves significant limitations regarding the time of operation of devices. The nodes whose battery level describes important energy depletion represent potential elements for loss of connectivity, which results in an increase of packet loss rate. Therefore, the management of energy expenditure is one of the main research challenges to face in ad hoc networks, especially when developing applications in real scenarios. However, energy management is not a trivial task due to the inherent features of this kind of networks, such as the distributed operation as well as the access medium mechanism. In that sense, traditional solutions of energy optimization based on the definition of power-saving intervals (sleep mode) are not suitable considering the operational characteristics of an ad hoc network, due to the substantial deterioration of network connectivity.

In addition, the exponential growth of applications focused on the transmission of multimedia contents (especially video) available on mobile devices involves specific quality of service levels. Consequently, the design of solutions for the optimization of energy resources should be carried out without degrading the Quality of Experience perceived by the users.

The contributions of this thesis are focused, in the first place, on the analysis of those factors which generate an increase of the energy consumption in the wireless medium and are related to the principle of operation of the radio interface. In particular, the intense operation in reception mode on the interference areas, as a result of the overhearing effect, as well as the high number of transmission retries due to channel access contention, are defined as the main aspects that increase energy demand in the network.

On the other hand, with the aim of optimizing energy resources in the nodes without causing damage on the Quality of Service, this thesis proposes meaningful improvements to the routing protocol by means of a cross-layer scheme. Specifically, the designed mechanism carries out an evaluation of both the energy capacity available in the nodes and the distribution of devices along the wireless medium.

To that end, this proposal introduces a new metric in the routing computation process, called strategic value, which reports the importance of a node in the network in terms of connectivity (i.e. number of neighbor nodes). This scheme aims to reduce the energy expenditure caused by the overhearing effect along the areas with higher node density as well as to extend the lifetime for those nodes with higher number of neighbors which are strategic to preserve network connectivity.

Additionally, considering the current pragmatic approach in ad hoc networks focused on the design of specific applications, the evaluation hereby presented has been performed by means of a simulation environment and also through the implementation of a testbed. Specifically, the operation of the proposed scheme has been analyzed on a set of ad hoc nodes which has been implemented through development platforms. Also, a software tool has been developed in order to control and configure the experiments. Results prove that the proposal allows to extend the lifetime of the network as well as to increase packet reception rate as a consequence of the prevention in the route breakages due to energy depletion.

Finally, it is worth mentioning that the knowledge acquired by the design, configuration and analysis of experiments by means of hardware devices, has motivated the development of proposals and application studies of ad hoc networks in real environments, which represent an additional contribution of this thesis dissertation.

Resumen

El presente trabajo de tesis doctoral aborda la problemática de las limitaciones de energía en redes inalámbricas ad hoc. En este tipo de redes, los nodos generalmente emplean baterías como fuente de alimentación, lo que limita de forma dramática la autonomía de funcionamiento. Los nodos con mayor agotamiento de energía constituyen potenciales elementos para la pérdida de conectividad parcial o total de la red ocasionando el incremento de la pérdida de paquetes. Por tanto, la gestión eficiente del gasto es uno de los principales desafíos a enfrentar en el ámbito de investigación de redes ad hoc, en especial para el desarrollo de aplicaciones en escenarios reales de operación. Sin embargo, dicha gestión no es una tarea trivial debido a las características inherentes de este tipo de redes, como por ejemplo la operación distribuida, así como el acceso compartido al medio inalámbrico. En tal sentido, los mecanismos usuales de optimización del gasto de energía basados en el establecimiento de períodos de bajo consumo (modo *sleep*), no se ajustan a las características operativas de una red ad hoc, debido al impacto notable que ocasionan sobre la conectividad en la red.

Además, el crecimiento significativo de las aplicaciones y servicios de distribución de contenidos multimedia, especialmente tráfico de vídeo, demandan niveles específicos de calidad de servicio. Por consiguiente, el diseño de soluciones de optimización de los recursos de energía disponible en los nodos no debe implicar la degradación de la calidad de experiencia percibida por los usuarios finales.

Las contribuciones del trabajo de tesis se centran, en primer lugar, en el análisis de los factores que incrementan el gasto de energía en el medio inalámbrico y que están relacionados con el principio de operación de la interfaz de radio. En particular, el incremento dramático del funcionamiento en modo recepción ocasionado sobre las zonas de interferencia por el efecto *overhearing* así como el mayor número de intentos de transmisión debido a la contienda por el acceso al canal, se definen como las principales causas que incrementan la demanda de energía en la red.

Por otra parte, con el objetivo de optimizar los recursos de energía disponibles en los nodos sin ocasionar un perjuicio sobre la calidad de servicio, en el presente trabajo de tesis se proponen mejoras al protocolo de encaminamiento mediante un esquema *cross-layer*. En concreto, el mecanismo diseñado realiza una evaluación de la capacidad de

energía disponible en los nodos, así como de la distribución de los dispositivos en el medio inalámbrico.

Con tal fin, la propuesta introduce en el cómputo de enrutamiento una métrica nueva denominada valor estratégico, la cual reporta la importancia de un nodo en la red en términos de conectividad (número de dispositivos vecinos). El esquema apunta a reducir el gasto de energía ocasionado por el efecto *overhearing* en las zonas con mayor densidad de dispositivos, así como extender la autonomía de operación sobre aquellos nodos con mayor número de vecinos, que resultan estratégicos para conservar la conectividad en la red.

Además, de forma consecuente con el actual enfoque pragmático en redes ad hoc orientado al diseño de soluciones para escenarios específicos de aplicación, la evaluación de la propuesta se ha realizado tanto en un entorno de simulación, así como mediante la implementación de un *testbed*. Específicamente, se ha analizado la operación del mecanismo de enrutamiento propuesto sobre un conjunto de nodos ad hoc implementados mediante plataformas de desarrollo. Adicionalmente, se ha desarrollado una herramienta para el control y configuración de los experimentos. Los resultados demuestran que la propuesta permite extender el tiempo de operación de la red, así como incrementar la tasa de paquetes en recepción como consecuencia de la prevención en la ruptura de los enlaces por agotamiento de energía.

Finalmente, cabe resaltar que la experiencia adquirida en el diseño, configuración y análisis de experimentos empleando dispositivos *hardware*, ha motivado el desarrollo de propuestas y estudios de aplicación de redes ad hoc sobre escenario reales. Dichos estudios representan una contribución adicional del presente trabajo de tesis.

Resum

El present treball de tesi doctoral aborda la problemàtica de les limitacions d'energia en xarxes sense fil ad hoc. En este tipus de xarxes, els nodes generalment empren bateries com a font d'alimentació, la qual cosa limita de forma dramàtica l'autonomia de funcionament. Els nodes amb major esgotament d'energia constitueixen potencials elements per a la pèrdua de connectivitat parcial o total de la xarxa, ocasionant l'increment de la pèrdua de paquets. Per tant, la gestió eficient de la despesa és un dels principals desafiaments a enfrontar en l'àmbit d'investigació de xarxes ad hoc, en especial per al desenvolupament d'aplicacions en escenaris reals d'operació. No obstant això, aquesta gestió no és una tasca trivial a causa de les característiques inherents d'este tipus de xarxes, com per exemple l'operació distribuïda així com l'accés compartit al mitjà sense fil. En este sentit, els mecanismes usuals d'optimització de la despesa d'energia basats en l'establiment de períodes de baix consum (mode sleep), no s'ajusten a les característiques operatives d'una xarxa ad hoc, a causa de l'impacte notable que ocasionen sobre la connectivitat a la xarxa.

A més, el creixement significatiu de les aplicacions i serveis de distribució de continguts multimèdia, especialment tràfic de vídeo, demanden nivells específics de qualitat de servei. Per tant, el disseny de solucions d'optimització dels recursos d'energia disponible en els nodes no ha d'implicar la degradació de la qualitat d'experiència percebuda pels usuaris finals.

Les contribucions del treball de tesi se centren, en primer lloc, en l'anàlisi dels factors que incrementen la despesa d'energia en el mitjà sense fil i que estan relacionats amb el principi d'operació de la interfície de ràdio. En particular, l'increment dramàtic del funcionament en mode recepció, ocasionat sobre les zones d'interferència per l'efecte overhearing, així com el major nombre d'intents de transmissió a causa de la contesa per l'accés al canal, es defineixen com les principals causes que incrementen la demanda d'energia a la xarxa.

D'altra banda, amb l'objectiu d'optimitzar els recursos d'energia disponibles en els nodes sense ocasionar un perjudici sobre la qualitat de servei, en el present treball de tesi es proposen millores al protocol d'encaminament mitjançant un esquema cross-layer. En concret, el mecanisme dissenyat realitza una avaluació de la capacitat d'energia disponible en els nodes així com de la distribució dels dispositius en el mitjà sense fil.

Amb tal fi, la proposta introduïx en el còmput d'encaminament una nova mètrica denominada valor estratègic, la qual reporta la importància d'un node en la xarxa en termes de connectivitat (nombre de dispositius veïns). L'esquema reduïx la despesa ocasionada per l'efecte overhearding a les zones amb major densitat de dispositius i estén l'autonomia d'operació sobre aquells nodes amb major nombre de veïns, que resulten estratègics per conservar la connectivitat a la xarxa.

A més, de forma conseqüent amb l'actual enfocament pragmàtic en xarxes ad hoc orientat al disseny de solucions per a escenaris específics d'aplicació, l'avaluació de la proposta s'ha realitzat tant en un entorn de simulació així com per mitjà de la implementació d'un testbed. Específicament, s'ha analitzat l'operació del mecanisme d'encaminament proposat sobre un conjunt de nodes ad hoc implementats mitjançant plataformes de desenvolupament. Addicionalment, s'ha desenvolupat una eina per al control i configuració dels experiments. Els resultats demostren que la proposta permet estendre el temps d'operació de la xarxa així com incrementar la taxa de paquets en recepció com a conseqüència de la prevenció en la ruptura dels enllaços per esgotament d'energia.

Finalment, cal ressaltar que l'experiència adquirida en el disseny, configuració i anàlisi d'experiments emprant dispositius hardware, ha motivat el desenvolupament de propostes i estudis d'aplicació de xarxes ad hoc sobre escenari reals. Aquests estudis representen una contribució addicional del present treball de tesi.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud y agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de estos años durante el desarrollo de esta investigación.

En especial, quiero agradecer profundamente a mis directores de tesis el Dr. Juan Carlos Guerri y el Dr. Pau Arce Vila, cuyos consejos y guía han sido de enorme valor y motivación durante mis estudios de doctorado. Gracias también a todos mis compañeros del Grupo de Comunicaciones Multimedia, por el ambiente de fraternidad y por compartir sus experiencias en investigación, que sin duda han sido un apoyo fundamental en el trabajo.

Gracias a mis padres, hermanos y familiares, a pesar de la distancia han estado presentes durante todo este tiempo brindándome apoyo.

Infinitamente gracias a mi esposa Carolina, su amor y apoyo incondicional han sido mi fuerza y motivación de cada día.

Finalmente, quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno de Ecuador, por el apoyo brindado mediante la concesión de la beca para realizar mis estudios de doctorado.

*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica: la voluntad*

~ Albert Einstein

A mis padres y a mi esposa Carolina

Contenidos

Capítulo 1. Introducción y Objetivos de la Tesis.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Redes Inalámbricas Ad Hoc	3
1.2.1. Consideraciones de diseño e implementación	4
1.2.2. Tipos de redes ad hoc y aplicaciones.....	6
1.2.3. Protocolos de enrutamiento	8
1.3. Definición del Problema y Objetivos	12
1.4. Estructura del Documento y Contribuciones.....	13
Capítulo 2. Consumo de Energía en Redes Ad Hoc: Consideraciones del Medio Inalámbrico	17
2.1. Características Operativas de la Interfaz de Radio	18
2.2. Consumo de Energía en el Medio Inalámbrico	21
2.2.1. Análisis de la interfaz de radio en zonas de interferencia.....	23
2.2.2. Análisis en un entorno multi-hop con diferentes niveles de conectividad..	29
2.3. Clasificación de Soluciones Propuestas en la Literatura	35
2.4. Conclusiones	38
Capítulo 3. OLSR Estratégico: Un Protocolo de Enrutamiento Cross-layer para Redes Ad Hoc	39
3.1. Introducción	40
3.2. Trabajos Relacionados	41
3.3. OLSR Estratégico.....	43
3.3.1. Valor estratégico.....	46
3.3.2. Análisis de energía	47
3.3.3. Cómputo de enrutamiento	47

3.4. Evaluación.....	49
3.4.1. Metodología.....	49
3.4.2. Escenario de Ejemplo.....	50
3.4.3. Escenario Campus.....	57
3.4.4. Escenario Aleatorio.....	60
3.5. Conclusiones.....	63
Capítulo 4. Evaluación de SOLSR mediante un Testbed.....	65
4.1. Introducción.....	65
4.2. Trabajos Relacionados.....	67
4.3. Arquitectura del Testbed.....	68
4.3.1. Implementación de los nodos ad hoc.....	68
4.3.2. Gestión remota de los nodos.....	70
4.4. Implementación de SOLSR.....	71
4.4.1. Captura del consumo de energía.....	71
4.4.2. Cómputo de enrutamiento.....	73
4.5. Evaluación Experimental de SOLSR.....	75
4.5.1. Caracterización de la tarjeta IEEE 802.11.....	75
4.5.2. Evaluación en el escenario de ejemplo.....	78
4.6. Conclusiones.....	85
Capítulo 5. Despliegue y Evaluación de Redes Inalámbricas Ad Hoc Multi-Hop..	87
5.1. Sistema de Vídeo Portero Inalámbrico para Edificios.....	87
5.1.1. Análisis de la distancia efectiva de transmisión.....	88
5.1.2. Caracterización del throughput en una topología lineal.....	90
5.1.3. Evaluación de una red ad hoc multi-hop en un edificio tipo.....	93
5.2. Sistema de Video Monitorización para Entornos Agrícolas.....	100
5.2.1. Nodo ad hoc prototipo.....	101
5.2.2. Arquitectura de gestión.....	102
5.2.3. Evaluación del nodo prototipo.....	103
5.3. Trabajo Futuro.....	105
5.4. Conclusiones.....	107
Referencias.....	109

Apéndice A. Listado de Publicaciones.....	117
Apéndice B. Detalles de Implementación.....	119

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Componentes del Nodo Ad hoc	18
Tabla 2.2	Niveles de Consumo de Corriente para Diferentes Modelos de Tarjetas Inalámbricas.....	21
Tabla 2.3	Métricas Descriptivas de los Estados Operativos de la Interfaz de Radio en el Simulador NS3.....	23
Tabla 2.4	Parámetros de Simulación para la Caracterización de la Distancia de Interferencia.....	23
Tabla 2.5	Parámetros Característicos del Vídeo	24
Tabla 2.6	Parámetros de Energía para el Análisis del Efecto Overhearing	28
Tabla 2.7	Parámetros de Simulación para el Escenario Multi-hop	30
Tabla 2.8	Condiciones de Operación en el Esquema de Gestión de Energía IEEE 802.11 para Modo IBSS.....	35
Tabla 3.1	Cómputo de Enrutamiento en el Mecanismo SOLSR.....	48
Tabla 3.2	Parámetros de Simulación para el Escenario de Ejemplo	51
Tabla 3.3	Parámetros de Simulación para el Escenario Campus	58
Tabla 3.4	Parámetros de Simulación para el Escenario Aleatorio	61
Tabla 4.1	Caracterización de la Tarjeta Inalámbrica de los Nodos Ad hoc	75
Tabla 4.2	Parámetros de Configuración Empleados en el Testbed.....	79
Tabla 4.3	Parámetros Empleados en la Configuración del Experimento.....	83
Tabla 5.1	Parámetros del Experimento para Determinar la Distancia de Transmisión	89
Tabla 5.2	Parámetros de Evaluación Empleando Tráfico CBR.....	95
Tabla 5.3	Parámetros para la Evaluación del Tráfico de Audio-Vídeo.....	97

Lista de Figuras

Figura 1.1	Red inalámbrica ad hoc multi-hop.....	4
Figura 2.1	Medición experimental del consumo de corriente en un nodo.....	19
Figura 2.2	Diagrama de estados de operación para una interfaz IEEE 802.11.....	20
Figura 2.3	Efecto overhearing y estados de operación de la interfaz de radio.....	22
Figura 2.4	Tasa de recepción de paquetes de acuerdo a la distancia de transmisión...	24
Figura 2.5	Escenarios para el análisis del efecto overhearing sobre un nodo de prueba bajo diferentes niveles de interferencia: (a) 2 nodos, (b) 4 nodos, (c) 12 nodos.....	25
Figura 2.6	Paquetes detectados por el nodo de prueba debido al efecto overhearing	26
Figura 2.7	Análisis del número de estados de transmisión según el número de nodos vecinos en la zona de interferencia	27
Figura 2.8	Energía residual en el nodo de prueba según su ubicación en las zonas de interferencia	28
Figura 2.9	Escenario multi-hop. (a) Ubicación y relación de conectividad entre los nodos. (b) Rutas alternativas entre el nodo 0 y el nodo 1	30
Figura 2.10	Distribución del tráfico según el número de estados de transmisión en cada nodo	31
Figura 2.11	Evaluación de los reintentos de envío en cada nodo.....	32
Figura 2.12	Análisis del número de estados de recepción y efecto overhearing.....	33
Figura 2.13	Evaluación del patrón de consumo de energía en cada nodo	34
Figura 3.1	Campos de aplicación y escenarios emergentes en redes ad hoc.....	40
Figura 3.2	Diagrama descriptivo del mecanismo OLSR Estratégico propuesto y rangos de interferencia en los dispositivos: (a) Nodos fuente y destino de tráfico. (b) Nodo intermedio A. (c) Nodo intermedio B. (d) Nodo intermedio C. (e) Establecimiento de la ruta.....	45
Figura 3.3	Diagrama esquemático: Inclusión de las métricas valor estratégico y energía residual en la cabecera del mensaje Hello.....	47
Figura 3.4	Diagrama descriptivo: Computo de routing OLSR estándar y esquema propuesto SOLSR	48
Figura 3.5	Diagrama esquemático de la metodología empleada para la evaluación de la propuesta.....	49
Figura 3.6	Escenario de ejemplo para la evaluación de la propuesta	50

Figura 3.7	Análisis de la distribución del tráfico acorde al número de estados de transmisión en cada nodo.....	52
Figura 3.8	Análisis de las pérdidas según la distribución del tráfico. (a) Paquetes perdidos por nodo. (b) Paquetes perdidos por mecanismo.....	53
Figura 3.9	Tasa de recepción de paquetes para las iteraciones de la secuencia de vídeo y comparación del tiempo de operación de la red.....	54
Figura 3.10	Porcentaje de consumo de energía para cada nodo en el escenario	55
Figura 3.11	Consumo promedio de energía para las zonas definidas en el escenario y a nivel de red	56
Figura 3.12	Comparación del PSNR promedio para las iteraciones del vídeo.....	56
Figura 3.13	Escenario de evaluación tipo campus	57
Figura 3.14	Resultados de la evaluación en el escenario campus. (a) Consumo de energía en las rutas. (b) Consumo de energía sobre las zonas 1 a 7. (c) Porcentaje de nodos operativos en la red y (d) Tasa de recepción de paquetes	59
Figura 3.15	Escenario Aleatorio	61
Figura 3.16	Resultados de la evaluación en el escenario aleatorio. (a) Análisis de la distribución del tráfico. (b) Consumo de energía sobre la zona de mayor conectividad (Z8) y (c) Porcentaje de nodos operativos en la red	63
Figura 4.1	Diagrama funcional para los nodos ad hoc implementados.....	68
Figura 4.2	Elementos del nodo ad hoc	69
Figura 4.3	Diagrama funcional del testbed implementado.....	70
Figura 4.4	Diagrama funcional del sistema de captura y medición del consumo de energía implementado sobre los nodos ad hoc.....	72
Figura 4.5	Diagrama esquemático para la implementación del protocolo SOLSR.....	74
Figura 4.6	Throughput resultante vs. Tráfico ofrecido (estándar 802.11g@54Mbps)	76
Figura 4.7	Consumo de corriente de la tarjeta inalámbrica vs. Throughput promedio	77
Figura 4.8	Muestras de corriente capturadas durante la operación de la tarjeta inalámbrica para diferentes flujos de tráfico. (a) 100kbps, (b) 400kbps, (c) 800kbps, (d) 2Mbps, (e) 8Mbps y (f) 17Mbps.....	78
Figura 4.9	Configuración del escenario de ejemplo para la evaluación de la propuesta mediante el testbed	79
Figura 4.10	Consumo de corriente en cada nodo durante la transmisión del vídeo	80
Figura 4.11	Throughput promedio capturado sobre los nodos intermedios	81
Figura 4.12	Throughput capturado sobre el dispositivo receptor (nodo 1)	82
Figura 4.13	Evaluación de la calidad en el flujo de los datos. (a) Tasa de paquetes en recepción. (b) PSNR	82
Figura 4.14	Muestras de corriente capturadas sobre el nodo 5. (a) OLSR estándar. (b) Mecanismo propuesto SOLSR.....	84
Figura 5.1	Experimento para determinar el rango de transmisión de los nodos ad hoc	89
Figura 5.2	Tasa de recepción de paquetes y nivel de PSNR según la distancia de transmisión.....	90

Figura 5.3	Diagrama descriptivo de la topología lineal desplegada para la caracterización del throughput.....	91
Figura 5.4	Análisis del tráfico en la topología lineal variable. (a) Comparación entre la carga ofrecida y el throughput promedio. (b) Comportamiento del throughput según el número de nodos	92
Figura 5.5	Despliegue de una red ad hoc multi-hop en el Edificio 8B (CPI), Universitat Politècnica de València, para el estudio del sistema de video portero inalámbrico. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.....	93
Figura 5.6	Análisis de la métrica RTT según el número de saltos	94
Figura 5.7	Evaluación del tráfico sobre el nodo intermedio N6. (a) Throughput promedio. (b) Tasa de pérdida de paquetes. (c) Perfil del tráfico	96
Figura 5.8	Evaluación y perfil del tráfico (audio-vídeo) unidireccional entre los nodos terminales N1 y N0. (a) Retardo promedio. (b) Tasa de pérdida de paquetes. (c) Flujo resultante 257kbps. (d) Flujo resultante 1009kbps.....	98
Figura 5.9	Imágenes del vídeo capturado en el nodo receptor N0, para diferentes tasas de codificación.....	100
Figura 5.10	Diagrama funcional y periféricos instalados en el nodo prototipo.....	101
Figura 5.11	Nodo ad hoc prototipo. (a) Dispositivos empleados. (b) Montaje y despliegue del nodo	102
Figura 5.12	Diagrama funcional de la arquitectura de vídeo monitorización implementada en el nodo prototipo.....	103
Figura 5.13	Evaluación del nodo ad hoc prototipo. (a) Carga de la CPU. (b) Temperatura de la CPU. (c) Consumo de corriente	104
Figura 5.14	Interfaz web y componentes del nodo ad hoc prototipo para la red de sensores acústica del proyecto SSPressing	106

Acrónimos

AAC	Advanced Audio Coding
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog to Digital Converter
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
AP	Access Point
ATIM	Announcement Traffic Indication Message
BMS	Battery Management Bus
BSS	Basic Service Set
CBR	Constant Bit Rate
CLI	Command Line Interface
CPU	Central Processing Unit
CS/CCA	Carrier Sense/Clear Channel Assessment
EROLSR	Energy Routing OLSR
FPS	Frames por Segundo
GoP	Group of Pictures
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
HLS	HTTP Live Streaming
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
IBSS	Independent BSS
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	International Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
ITS	Intelligent Transportation Systems
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network
MDR	Minimum Drain Rate
MPR	Multipoint Relay
NS2	Network Simulator 2
NS3	Network Simulator 3
NTP	Network Time Protocol
OLSR	Optimized Link State Routing

PCI	Peripheral Component Interconnect
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMD	Physical Medium Dependent
PSM	Power Save Mode
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
QoS	Quality of Service
RFC	Request for Comments
RPi	Raspberry Pi
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Roud Trip-delay Time
SBC	Single Board Computer
SD	Secure Digital
SIR	Signal to Interference Ratio
SMBus	System Management Bus
SOLSR	Strategic OLSR
SPF	Short Path First
SSH	Secure Shell
SSID	Service Set Identifier
SV	Strategic Value
SVC	Scalable Video Coding
TC	Topology Control
TS	Transport Stream
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
USB	Universal Serial Bus
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VANET	Vehicular Ad hoc Network
WMN	Wireless Mesh Network
WSN	Wireless Sensor Network

Capítulo 1

Introducción y Objetivos de la Tesis

En este capítulo se presenta una introducción del trabajo de tesis doctoral y se describen las principales características de operación, aplicaciones y aspectos a considerar para el diseño de redes inalámbricas ad hoc. Adicionalmente, se describe los objetivos y la estructura del documento, así como las contribuciones desarrolladas enfocadas en un mecanismo de optimización energética sin perjuicio de la calidad de servicio del tráfico multimedia en redes inalámbricas ad hoc.

1.1. Antecedentes

Una red inalámbrica ad hoc es un paradigma de comunicación donde los elementos participantes, generalmente denominados nodos, tienen la capacidad de organizarse y establecer enlaces sin el requerimiento de una estación central coordinadora. La forma más simple de una red ad hoc es un esquema de comunicación punto a punto formada por dispositivos que se encuentran dentro del rango de transmisión. En la actualidad, la mayoría de estándares inalámbricos soportan este modo de operación tal como: Zigbee (IEEE 802.15.4), Bluetooth (IEEE 802.15.1) y Wi-Fi (IEEE 802.11). Por otra parte, si los nodos origen y destino se encuentran fuera de la distancia de transmisión, la comunicación puede ser establecida a través de nodos intermedios que, además de la función de dispositivo terminal, cooperan en el reenvío de datos conformando múltiples enlaces hasta alcanzar al nodo receptor. Tal esquema de comunicación se denomina red *multi-hop*, o red móvil ad hoc (MANET) si se considera que los nodos intermedios son dispositivos con libertad de desplazamiento.

Las redes ad hoc son especialmente atractivas en escenarios donde los costes y complejidad son una limitación para el despliegue de redes basadas en infraestructura (p.ej. redes celulares). Históricamente este tipo de tecnología fue ideada con fines tácticos para aplicaciones de comunicación en entornos militares y de supervivencia.

Proyectos tales como PRNet (*Packet Radio Network*, 1972) o SURANs (*Survivable Radio Networks*, 1983) son algunos ejemplos de los primeros esfuerzos desarrollados para su aplicación. Posteriormente, en la década de los noventa, la investigación en redes ad hoc experimentó un crecimiento notable, gracias a la aceptación e incursión en el mercado de los sistemas de comunicación inalámbricos. En principio, los esfuerzos se enfocaron en aspectos claves de operación, tal como el soporte de calidad de servicio, diseño de mecanismos de enrutamiento, seguridad y eficiencia energética, resultando en una cantidad significativa de trabajos, estudios y artículos científicos con un impacto especialmente en el ámbito académico. No obstante, es aproximadamente a partir de la última década que la experiencia derivada de las actividades de investigación ha permitido la aceptación de la tecnología ad hoc en la industria. Dicha incursión en el mercado ha sido impulsada por el planteamiento de la comunidad científica de áreas específicas de aplicación.

Adicionalmente, la masificación en el uso de dispositivos móviles y en general, el desarrollo de la computación móvil en términos de integración y capacidad del *hardware*, han contribuido a un creciente interés por el potencial que describen este tipo de redes, especialmente en la implementación de nuevos escenarios como por ejemplo *Smart Cities*, así como también para el desarrollo de aplicaciones basadas en el concepto de *Internet of Things* (IoT). En ese sentido, el diseño y provisión de servicios es un desafío latente. En particular, la naturaleza compartida del medio inalámbrico y en especial el mecanismo de acceso, restringen la capacidad para asegurar requerimientos de *throughput* y, por tanto, niveles de calidad de servicio (QoS). Dicho comportamiento es crítico en aplicaciones con baja tolerancia al retardo y gran demanda de ancho de banda, tal como los servicios de transmisión de vídeo, los cuales cuentan con gran popularidad en la actualidad. Otro aspecto a considerar es la demanda de recursos *hardware* derivada del procesamiento y transmisión del tráfico de vídeo que incrementa de forma dramática el gasto de energía en los dispositivos móviles. El escenario resulta aún más complejo considerando que la tecnología de baterías no ha experimentado un ritmo de desarrollo a la par que la industria de dispositivos electrónicos. Un claro ejemplo son las baterías de litio empleadas actualmente en la mayoría de equipos portátiles, pero cuya tecnología de fabricación tiene origen en los años ochenta. Tal restricción de energía condiciona el tiempo de operación de un nodo comprometiendo la conectividad de la red y, por tanto, el soporte de calidad de servicio en las aplicaciones.

Un mecanismo de optimización descrito en los estándares inalámbricos consiste en definir intervalos de funcionamiento en un modo de bajo consumo (*sleep mode*). Sin embargo, dichos esquemas de gestión han sido ideados para redes estructuradas y su adaptación a un entorno distribuido no es una tarea trivial, además resulta en una

importante degradación en la conectividad. Una alternativa es el diseño de protocolos de enrutamiento acorde a las limitaciones de operación en los dispositivos. Con tal objetivo, la aplicación de un mecanismo *cross-layer* resulta adecuado para alcanzar un mejor conocimiento de los recursos disponibles. La información recolectada puede ser empleada por la capa de red (p.ej. energía consumida, residual), para el establecimiento de rutas que permitan equilibrar el gasto de energía entre los nodos y reducir el impacto negativo en la conectividad. Dicho esquema requiere el trabajo conjunto de la capa física y la capa de red. Sin embargo, un mecanismo podría incluir la participación de varias capas de la arquitectura. Por consiguiente, el diseño de propuestas enfocadas en optimizar el gasto de energía minimizando el impacto sobre la calidad de servicio es un área de investigación activa en redes ad hoc, la misma que además ha captado un gran interés debido a su importancia para el despliegue de aplicaciones en entornos reales.

Por otra parte, en relación a la metodología experimental de investigación en MANETs, tradicionalmente ha sido dominada por el uso de herramientas de simulación (p.ej. *NS2*, *NS3*, *OMNet++*, etc). Sin embargo, consecuente con el actual enfoque pragmático, resulta adecuada la evaluación de propuestas mediante el uso de un *testbed* que complemente el análisis realizado en simulaciones y caracterice la operación de propuestas en condiciones reales. La evaluación empleando *hardware* conlleva esfuerzos adicionales en términos de desarrollo, configuración, instalación y control de experimentos. Muestra de ello es la limitada cantidad de estudios que aplican tal metodología. No obstante, en la actualidad se encuentran disponibles en el mercado una variedad de plataformas de desarrollo, con un coste reducido, que permiten el diseño de herramientas de análisis. Dicha metodología experimental basada en un *testbed* ha sido empleada durante el desarrollo de la tesis en conjunto con el uso de herramientas simulación.

1.2. Redes Inalámbricas Ad Hoc

Un escenario *multi-hop* es el modo de operación con mayor potencial de aplicación para una red inalámbrica ad hoc. En la Figura 1.1, se presenta un diagrama descriptivo para un escenario de este tipo. En particular, considerando la característica distribuida de una red ad hoc, los protocolos de enrutamiento constituyen elementos claves en este tipo de entornos. Específicamente, aspectos tales como la hostilidad del medio inalámbrico debido a su naturaleza variable y ruidosa, la libertad de desplazamiento de los nodos, la diversidad de dispositivos en cuanto a recursos del *hardware* (p.ej. CPU, almacenamiento, etc), así como en relación a parámetros operativos (p.ej. potencia, *bitrate*, estándar, etc) son factores que añaden complejidad en el diseño de mecanismos de *routing*. Dichas condiciones ocasionan un conjunto de características de operación que resultan inherentes para este tipo de redes y conllevan desafíos significativos de diseño e implementación.

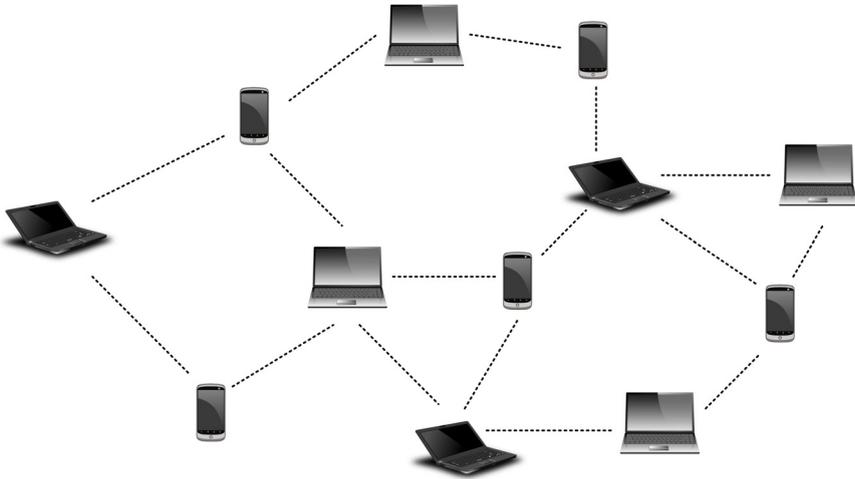


Figura 1.1 Red inalámbrica ad hoc *multi-hop*

1.2.1. Consideraciones de diseño e implementación

A continuación, se resaltan las características a tener en cuenta para el despliegue de una red inalámbrica ad hoc.

- **Operación distribuida**

La principal característica de una red ad hoc es la ausencia de una entidad central de control y gestión de la red. Este principio de operación permite que la red pueda ser conformada independientemente del lugar y sin mayor demora. Con tal objetivo, los nodos deben cooperar en la gestión y conectividad de la red, además de cumplir su funcionalidad de terminal. En este tipo de escenarios, un diseño adecuado de protocolos de *routing* resulta esencial para el descubrimiento de potenciales nodos intermedios y el cálculo de las rutas. A su vez, la complejidad de dichos mecanismos tiene una relación directa con el tipo de aplicación a implementar. Por ejemplo, la transmisión de datos en tiempo real y en general los servicios multimedia, son menos tolerantes al retardo por lo que requieren niveles específicos de calidad de servicio.

- **Capacidad y diversidad de dispositivos**

Los nodos de una red ad hoc usualmente son dispositivos móviles, como por ejemplo, ordenadores portátiles, *smartphones*, microordenadores embebidos, etc., caracterizados por limitaciones en cuanto a velocidad, capacidad de procesamiento, almacenamiento y restricciones de energía debido al uso de baterías. Por tanto, la capacidad de los nodos tiene un efecto directo en el funcionamiento y tiempo de operación de la red.

Por otra parte, un factor práctico a considerar es la compatibilidad de un dispositivo móvil para operar en modo ad hoc. En particular, algunos controladores de tarjetas inalámbricas no implementan dicho mecanismo de funcionamiento o requieren configuraciones adicionales de mayor complejidad.

- **Topología dinámica**

La característica de movilidad de los nodos genera un cambio constante en la topología de la red. Dicho comportamiento ocasiona intervalos de interrupción en la conectividad y, por tanto, una susceptibilidad a incrementar la pérdida de paquetes. En consecuencia, el diseño adecuado de los protocolos de enrutamiento debe considerar la rápida adaptación de los procesos de mantenimiento y cálculo de las rutas, con el fin de reducir el impacto, especialmente en escenarios caracterizados por una alta movilidad.

- **Capacidad y calidad de los enlaces**

El medio inalámbrico es un recurso compartido, la probabilidad de acceso es menor conforme se incrementa el número de nodos. Como resultado, en un entorno *multi-hop*, la capacidad de los enlaces es variable a lo largo del escenario en función de la ubicación de los nodos de origen y destino del tráfico y de la cantidad de dispositivos que participan en la contienda. Adicionalmente, los mecanismos de control del tráfico a nivel MAC (p.ej. mensajes *ACK*) generan una reducción adicional del ancho de banda disponible. Por otra parte, la naturaleza impredecible y ruidosa del canal inalámbrico es un factor adicional que compromete la calidad de un enlace. La adaptación del tráfico acorde a las condiciones del medio, así como el establecimiento de rutas con menor nivel de congestión, son algunas técnicas a considerar para hacer frente a los desafíos derivados de la inestabilidad en los enlaces.

- **Seguridad**

Las redes inalámbricas son especialmente vulnerables en aspectos de seguridad en comparación con una red cableada. En un escenario distribuido como es el caso de una red ad hoc, los mecanismos de seguridad deben ser configurados en cada nodo, ya que la implementación de un elemento central que coordine las tareas de seguridad resulta de gran complejidad. En particular, la red es susceptible a la presencia de nodos que inyectan tráfico con el fin agotar los recursos o corromper los datos. La implementación de mecanismos de autenticación, cifrado y análisis del comportamiento de los nodos basada en la información capturada del medio, son algunas técnicas para mejorar la seguridad e integridad de los datos en redes ad hoc.

1.2.2. Tipos de redes ad hoc y aplicaciones

La definición de escenarios específicos de aplicación ha sido un factor decisivo para lograr la incursión y aceptación de la tecnología ad hoc en el mercado. Tales planteamientos se basan en un enfoque pragmático y positivo de las características inherentes al paradigma *multi-hop*, tal como beneficiarse de la operación distribuida, ver la movilidad de los nodos como una oportunidad de comunicación, y la posibilidad de incluir elementos de redes estructuradas. A partir de dicho enfoque, a continuación se presenta una clasificación de las áreas de aplicación para las redes ad hoc.

- **Redes vehiculares (VANETs)**

Las redes vehiculares son un ejemplo de la incursión de la tecnología ad hoc impulsada, en este caso, por el desarrollo de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Las aplicaciones se enfocan en la gestión eficiente del tráfico, prevención de accidentes, y adicionalmente aplicaciones de tipo comercial, especialmente servicios de difusión. La operación de la red contempla dos modos de comunicación: entre vehículos y estaciones distribuidas a lo largo del camino denominada V2I (*Vehicle to Infrastructure*), así como la comunicación directa entre vehículos V2V (*Vehicle to Vehicle*) basado en el esquema *multi-hop*.

En la actualidad, no existe un estándar común en VANETs. No obstante, las principales variantes definidas en Europa (ETSI ITS G5) [1] y Estados Unidos (IEEE 1609 WAVE) [2] emplean el estándar IEEE 802.11 y están implementadas en la banda de 5.9GHz. En cuanto a experimentación y despliegue de VANETs, se resalta DRIVE C2X [3], el cual consiste en un Proyecto Europeo que evalúa la comunicación V2V y la experiencia de usuarios respecto a servicios de gestión de tráfico y seguridad. Otro ejemplo es FOTsis [4], un proyecto que evalúa la interacción entre conductores y los sistemas de emergencia, así como el programa *Connected Vehicle Safety Pilot* [5] desarrollado por el Departamento de Transporte (DoT) en Estados Unidos para la implementación de aplicaciones de seguridad en las vías, mediante los sistemas de comunicación V2I y V2V.

- **Redes tipo mesh (WMN)**

Las redes tipo *mesh* ó *wireless mesh network* son el caso más representativo de la aplicación práctica de las redes ad hoc. Las redes *mesh* están conformadas por una arquitectura híbrida compuesta por un *backbone* con nodos fijos y un conjunto de nodos móviles como clientes. Su principal característica es que permite el despliegue de redes de acceso reduciendo el impacto de la movilidad al último salto (nodos clientes). Su desarrollo es resultado de iniciativas de comunidades de usuarios para establecer enlaces empleando tecnología IEEE 802.11 para el soporte de aplicaciones tales como transferencia de archivos o compartir una conexión a Internet de alta velocidad.

En particular, existen proyectos destacables a nivel metropolitano, usualmente denominados *Municipal Wireless Networks*, con el objetivo de extender la cobertura de Internet en las ciudades, como por ejemplo *Urbizone* en Bélgica [6] y *Wireless Leiden* [7], entre otros. Proyectos adicionales para el despliegue de redes de acceso mediante WMN se describen en [8].

- **Redes de sensores (WSN)**

Las redes de sensores consisten en un tipo especial de red ad hoc orientada a la captura y monitorización de eventos y variables físicas. Los nodos usualmente son implementados sobre plataformas de desarrollo (microordenadores), provistos de baterías. Por tanto, las limitaciones en cuanto a recursos computacionales y, en especial, de energía es un desafío latente en WSNs. En cuanto a la arquitectura, normalmente contempla un elemento de enlace o *gateway* hacia Internet. De esta forma, los datos capturados a través de los sensores instalados en los nodos se envían siguiendo una comunicación *multi-hop* hasta alcanzar al *gateway*. En este tipo de escenarios, es deseable una alta densidad de dispositivos para el establecimiento de rutas entre los nodos y hacia Internet, especialmente cuando el despliegue se realiza en zonas de gran extensión, tal como aplicaciones en agricultura [9]. En escenarios con menor o baja densidad, se suelen emplear dispositivos móviles para la recolección de los datos adquiridos por los elementos fijos y posteriormente transferirlos al nodo *gateway*. Otro caso de uso destacable de redes de sensores son las aplicaciones médicas con fines de prevención y control de la salud en los pacientes. Los sistemas más recientes emplean tecnología *wearable* para la recolección de los datos así como aplicaciones desarrolladas sobre dispositivos móviles para la monitorización remota [10].

- **Comunicación oportunista**

El concepto de comunicación oportunista se refiere a una visión más optimista de la característica de movilidad de los nodos. Se basa en la capacidad que tiene un dispositivo para almacenar o capturar datos en un *buffer* mientras se desplaza en la red hasta lograr el establecimiento de un enlace con un nodo que actúe como próximo salto hacia el destino.

Los ambientes caracterizados por una alta densidad de dispositivos (p.ej. *smartphones*) constituyen escenarios atractivos para su aplicación. Considerando que se explota el concepto de la movilidad de los nodos los cuales usualmente son dispositivos de usuario, es el desplazamiento de las personas lo que genera las oportunidades de comunicación. Por consiguiente, el análisis de las propiedades de movilidad humana es un campo de investigación clave para el diseño de redes oportunistas [11]. El principal objetivo se enfoca en lograr una caracterización de las propiedades temporales del conjunto humano/dispositivo, en concreto el tiempo de contacto entre dos dispositivos, así como el tiempo transcurrido hasta establecer el contacto entre los mismos.

- **Smart Cities – IoT**

El término de ciudad inteligente o *smart city* es un concepto actual que define un desarrollo urbano basado en la sostenibilidad con eficiencia en infraestructuras y prestación de servicios. Acorde a este objetivo, los sistemas de comunicación ad hoc, y en especial las redes de sensores, presentan un gran potencial para facilitar la interconexión y cooperación entre diversos tipos de agentes tales como: usuarios, sensores y actuadores. En concreto, el control del tráfico, gestión de movilidad, monitorización y difusión de condiciones climáticas, caracterización de zonas urbanas (índices de ruido, contaminación, etc), sistemas de alerta ante emergencias, son algunas aplicaciones posibles [12]. Otro concepto emergente es el *Internet of Things* (IoT). Un paradigma de comunicación que describe la interconexión entre dispositivos físicos e Internet. Un campo especialmente atractivo para la aplicación de este concepto es la automatización y gestión remota de ambientes (p.ej. hogares, edificios, etc), donde las redes ad hoc pueden tener un rol importante [13].

- **Redes aéreas (FANETs)**

Las redes FANETs (*Flying Ad Hoc Networks*), representan una aplicación reciente derivado del desarrollo tecnológico y popularidad en el uso de dispositivos aéreos no tripulados o drones. A éste tipo de redes también se les conocen como UAVN (*Unmanned Aerial Vehicle Networks*).

Dicho escenario consiste en la aplicación del concepto MANET para el establecimiento de enlaces entre los dispositivos UAV. Las particularidades en cuanto a distancias entre los nodos y las características de movilidad han motivado su categorización como un nuevo escenario ad hoc, dando lugar a líneas de investigación, especialmente en cuanto a diseño de protocolos de *routing*, análisis de movilidad y topologías [14], [15]. En cuanto a sus aplicaciones se destaca el trabajo en conjunto con redes de sensores para la monitorización de zonas agrícolas de gran extensión [16], estudios adicionales proponen la aplicación de UAVN para el soporte de conectividad en zonas afectadas durante eventos de emergencia [17], [18].

1.2.3. Protocolos de enrutamiento

El diseño de protocolos de encaminamiento es un área activa de investigación desde los inicios del paradigma de comunicación ad hoc. Las tareas de estandarización y caracterización de los protocolos están lideradas por el grupo de trabajo MANET-IETF [19]. En particular, los mecanismos de *routing* tienen como objetivo definir trayectorias que permitan la comunicación entre nodos ubicados fuera del rango de transmisión. En MANETs dichas rutas son conformadas a través de nodos intermedios que colaboran para el establecimiento de un esquema *multi-hop*. El diseño de estos mecanismos no es una tarea trivial debido a la naturaleza dinámica de la topología, la inestabilidad de los enlaces y las limitaciones de los recursos *hardware* en los dispositivos.

Acorde a las condiciones descritas, la operación de un protocolo de *routing* debe seguir un enfoque distribuido, dotando a cada nodo de mecanismos para el descubrimiento de dispositivos vecinos y capacidad de colaboración en la definición de rutas. Adicionalmente, los protocolos deben asumir la potencial asimetría en los enlaces inalámbricos que puede resultar en trayectorias unidireccionales y, por consiguiente, se requiere la definición de rutas de respaldo en cada sentido de comunicación. La gestión de los recursos es otro factor a considerar, en especial en lo que respecta a optimizar el gasto de energía y la demanda de acceso al canal para la difusión de mensajes de *routing*. Por otra parte, las aplicaciones constituyen un aspecto decisivo de diseño, mediante la definición de prioridades con el objetivo de alcanzar mejoras específicas de operación en los protocolos, especialmente en aspectos tales como el soporte de calidad de servicio, la reducción del gasto de energía y la seguridad, entre otros.

Considerando la complejidad de solventar todos los requerimientos en un planteamiento único, los esfuerzos en investigación han dado lugar a una cantidad apreciable de propuestas centradas en minimizar el impacto de alguno o varios de los desafíos inherentes en MANETs. A continuación, se presenta una clasificación de los protocolos de enrutamiento, acorde a las estrategias de operación empleadas.

- **Broadcast**

La difusión de datos o *broadcast* es un mecanismo básico de operación en redes inalámbricas ad hoc. Dicho esquema es muy empleado por los protocolos de *routing*, especialmente en las etapas de descubrimiento de vecinos y mantenimiento de rutas. La operación consiste en inundar el canal (*blind flooding*) con información destinada hacia todos los nodos en la red. Por consiguiente, es susceptible a generar redundancia en la transmisión de mensajes, ocasionar una intensa contienda por el medio e incrementar de forma dramática la colisión de paquetes y el consumo de recursos. A pesar de los inconvenientes, es un mecanismo útil en escenarios donde la difusión de información es crítica, como por ejemplo eventos de emergencia. En [20] y [21] se describe un compendio de mecanismos para reducir los efectos derivados del *broadcast*. Dichas técnicas se basan en métodos probabilísticos, localización y conformación de *clusters*, entre otros. Adicionalmente, en [22] se describe un mecanismo que asigna la tarea de difusión únicamente a nodos especiales denominados *Multipoint Relays* (MPR), lo que permite reducir de forma significativa la redundancia de mensajes durante el *broadcast*.

- **Multicast**

Los mecanismos de enrutamiento *multicast* tienen por objetivo el envío de información a un grupo específico de nodos. El soporte de vídeo bajo demanda, *streaming* de datos, aplicaciones colaborativas, son ejemplos de servicios caracterizados por un consumo de tráfico en modo *multicast*. En MANETs, este tipo de protocolos emplean diferentes estrategias para el establecimiento de rutas entre los elementos pertenecientes a un grupo. Dichos esquemas usualmente consideran la densidad nodos, número de fuentes,

tipo de tráfico y distribución topológica. Los mecanismos AMRoute (*Ad Hoc Multicast Routing*) [23] y CORA (*Collaborative Opportunistic Recovery Algorithm*) [24] son ejemplos de protocolos *multicast* que implementan una estructura tipo árbol. Los mensajes son reenviados una única vez en cada una de las ramas hasta alcanzar a todos los elementos de la topología. Otro mecanismo empleado es la conformación de una arquitectura tipo *mesh*. Dicho esquema resulta más robusto, en especial en escenarios con topologías variables. Sin embargo, la complejidad en el mantenimiento de la estructura se incrementa significativamente. Ejemplos de este tipo de mecanismos son los protocolos OMDRP (*On-Demand Multicast Routing Protocol*) [25] y QMRP (*mesh-based QoS Multicast Routing Protocol*) [26].

- **Geocast**

Geocast es una variante del esquema de transmisión *multicast* en el cual los grupos son conformados de acuerdo a la ubicación de los nodos en zonas geográficas específicas.

Tal enfoque es de interés en escenarios que requieran servicios de localización, como por ejemplo aplicaciones en redes vehiculares. La pertenencia a un grupo se establece mediante la inclusión de la ubicación geográfica en los mensajes de enrutamiento (*geocast packets*), la cual es obtenida a partir de sistemas de posicionamiento (GPS) disponibles en los nodos. SPBM (*Scalable Position-Based Multicast*) [27], EGMP [28] (*Efficient Geographic Multicast Protocol*), entre otros, son ejemplos de mecanismos de enrutamiento *geocast* propuestos para MANETs.

- **Proactivos, reactivos**

Los protocolos de enrutamiento proactivos y reactivos comprenden la clasificación con mayor número de propuestas en MANETs. Dichos esquemas se enfocan en el establecimiento de enlaces tipo *unicast*. Su diseño se basa en parte, en los mecanismos vector distancia y estado de enlace de los protocolos de Internet, adaptados a las características del escenario ad hoc. En cuanto a su operación, en los esquemas proactivos, también denominados *table driven*, los dispositivos mantienen información acerca de cada uno de los nodos presentes en la red. Dicha información es actualizada periódicamente y se almacena en tablas (p.ej. tabla de nodos vecinos, tabla topológica, tabla de rutas). De esta forma cada nodo obtiene una visión completa de la topología.

OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) [29], [30], es un ejemplo de protocolo proactivo estandarizado por el grupo de trabajo de MANET-IETF (*RFC 3626*, *RFC 7181*). Su principal característica es la selección de nodos MPR (*Multipoint Relay*) para la difusión de mensajes de control topológico, lo que permite limitar el tráfico *broadcast*. En [31] se describen algunos otros ejemplos de mecanismos proactivos, tal como DSDV (*Destination Sequence Distance Vector*), WRP (*Wireless Routing Protocol*), GSR (*Global State Routing*) y FSR (*Fisheye State Routing*).

Por otra parte, los protocolos reactivos llevan a cabo el establecimiento de rutas únicamente cuando éstas son requeridas. El proceso generalmente se inicia en un nodo fuente a través de un mecanismo de descubrimiento que consiste en la generación de mensajes de solicitud y réplica, hasta alcanzar al nodo destino. Comparado con los mecanismos proactivos, la conformación de rutas bajo demanda permite reducir considerablemente la carga de tráfico de *routing*, sin embargo existe mayor susceptibilidad al incremento en el retardo. Entre los protocolos reactivos propuestos en MANETs se resalta el mecanismo AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) [32] (RFC 3561) y su sucesor en proceso de estandarización DYMO (AODVv2) [33], así como los protocolos DSR (*Dynamic Source Routing*), TORA (*Temporarily Ordered Routing Algorithm*), ABR (*Associativity-Based Routing*), descritos en [31].

- **Híbridos**

Los protocolos híbridos implementan en conjunto esquemas de enrutamiento proactivos y reactivos. Usualmente son diseñados para escenarios donde es posible conformar grupos de nodos (*clusters*). El mecanismo proactivo es aplicado dentro de los *clusters* mientras que el enrutamiento reactivo permite la conformación de rutas entre los grupos. Dicho esquema requiere la selección de nodos que sirvan de enlace entre los grupos (*head clusters*), conformando un esquema jerárquico. Los mecanismos ZRP (*Zone Routing Protocol*), ZHLS (*Zone-based Hierarchical Link State*), SLURP (*Scalable Location Update-based Routing Protocol*), son algunos ejemplos de protocolos híbridos [31]. Por otra parte en [34], se realiza un análisis de protocolos híbridos para la transmisión de vídeo en redes ad hoc, comparado con arquitecturas planas.

- **Métricas**

Una categoría adicional de mecanismos de enrutamiento se enfoca en explotar métricas diferentes al esquema tradicional basado en el número de saltos. En su mayor parte, este tipo de propuestas implementan modificaciones sobre un protocolo previamente diseñado, con el objetivo de mejorar su operación, por ejemplo en cuanto a parámetros de calidad de servicio, gasto de energía o seguridad. El análisis del *throughput*, *delay*, estabilidad de los enlaces, tasa de pérdida de paquetes, nivel de energía, ancho de banda disponible, etc. son algunas variables a considerar para su diseño. Acorde al tipo de métricas, este tipo de protocolos usualmente requiere un mayor conocimiento del entorno además de la información proporcionada por la capa de red. En tal sentido, una estrategia *cross-layer* resulta de gran utilidad en el diseño. En [35] y [36] se presentan ejemplos de trabajos que implementan dicho enfoque para el soporte de *QoS* en MANETs.

1.3. Definición del Problema y Objetivos

Las redes inalámbricas ad hoc se caracterizan por la capacidad de autoconfiguración, gestión distribuida y en especial un rápido despliegue sin el condicionamiento de infraestructuras preexistentes y de alto coste. Adicional a dichas ventajas, el crecimiento de la computación móvil y la definición de nuevos escenarios y conceptos de comunicación (p.ej. *Smart Cities*, *Internet of Things*) hacen de esta tecnología una alternativa para la provisión de servicios. Sin embargo, su aplicación plantea un conjunto de desafíos derivados de la naturaleza compartida del medio inalámbrico y las limitaciones en cuanto a recursos *hardware*.

En MANETs, los nodos se caracterizan por ser elementos autónomos provistos de baterías y por consiguiente con restricciones en cuanto al tiempo de operación. Los nodos que presentan un agotamiento de energía constituyen potenciales elementos de desconexión, que resulta en pérdidas temporales o definitivas de conectividad y por tanto en un incremento significativo de la tasa de pérdida de paquetes. Dichas condiciones de operación son críticas para aplicaciones con requerimientos específicos de calidad de servicio (QoS) como la transmisión de contenidos multimedia. En particular, el tráfico de vídeo demanda una mayor carga sobre el *hardware*, incrementando de forma dramática el consumo de energía. La adecuada gestión de dicho recurso es por consiguiente un factor clave para la operatividad de la red. No obstante, la implementación de mecanismos de optimización no debe implicar la degradación en cuanto a la calidad del servicio percibida por los usuarios.

En tal sentido, los esquemas basados en periodos de menor consumo (*sleep mode*) no se ajustan al funcionamiento de aplicaciones con baja tolerancia al retardo como el tráfico de vídeo. Por otra parte, los mecanismos de enrutamiento estándar no consideran el nivel de energía disponible en los dispositivos para el establecimiento de trayectorias, ocasionando a menudo una sobrecarga sobre nodos con mayor conectividad y por tanto un rápido agotamiento de su energía, afectando considerablemente el funcionamiento de la red.

Por consiguiente, se requiere de mecanismos adicionales que permitan mejorar la planificación del gasto de energía reduciendo el impacto negativo sobre la conectividad.

En tal contexto el objetivo principal del presente trabajo de tesis se enfoca en:

Optimizar el consumo de energía en redes inalámbricas ad hoc mediante nuevas mejoras en el mecanismo de enrutamiento que permita planificar el gasto de energía acorde a las condiciones en la red y prevenga la pérdida de conectividad para evitar la degradación en la transmisión de vídeo.

Para alcanzar el objetivo principal, los objetivos específicos y desafíos a considerar son:

Q1. Analizar las principales causas para el incremento del gasto de energía en el entorno inalámbrico. La evaluación se realizará mediante la caracterización de los estados de operación de la interfaz inalámbrica en escenarios con diferentes condiciones de interferencia y densidad de dispositivos.

Q2. Proponer y evaluar un mecanismo *cross-layer* que considere la capacidad de energía en los nodos y la distribución del entorno inalámbrico mejorando la fiabilidad en la transmisión de paquetes. El mecanismo estará basado en el protocolo de *routing* OLSR muy empleado en redes ad hoc. El algoritmo consiste en la aplicación de un esquema *cross-layer* que combina información de la capa física y de red (nivel de energía, número de nodos vecinos) para la conformación de rutas con una adecuada capacidad de energía y menor nivel de congestión. La operación del protocolo se evaluará en un entorno de simulación considerando parámetros de rendimiento en cuanto a energía y calidad en la transmisión del tráfico de vídeo, en comparación con mecanismos similares.

Q3. Analizar y evaluar el mecanismo *cross-layer* propuesto bajo condiciones realistas de operación. Para la evaluación se implementará un *testbed* empleando plataformas *hardware* de desarrollo. El algoritmo será implementado y configurado sobre cada dispositivo. Para el análisis del gasto de energía, sobre cada nodo se desarrollará un sistema de adquisición y procesamiento de la energía demandada por las tarjetas inalámbricas. Se evaluará el rendimiento del protocolo empleando el *testbed*, en comparación con el mecanismo OLSR estándar.

Q4. Diseñar y evaluar propuestas específicas de aplicación de redes inalámbricas ad hoc en entornos reales de operación, mediante el equipamiento previamente desarrollado en el *testbed*. La evaluación de las propuestas, se enfocará en el análisis del rendimiento en la transmisión de vídeo empleando tecnología ad hoc para el soporte de conectividad y transporte del tráfico.

1.4. Estructura del Documento y Contribuciones

El presente trabajo de tesis proporciona un conjunto de contribuciones en redes inalámbricas ad hoc, relacionadas con el estudio del gasto de energía, mejoras en el mecanismo de *routing* para la optimización de dicho recurso y la evaluación del rendimiento de una red ad hoc en un entorno real de operación. El documento está organizado en los siguientes capítulos.

- Capítulo 1 – Introducción y Objetivos de la Tesis

Este capítulo abarca un conjunto de conceptos introductorios acerca de las redes inalámbricas ad hoc. Se describen las principales características, las áreas de interés para su aplicación, así como las ventajas y desafíos inherentes a la operación. En particular, se resalta los inconvenientes generados por la limitada capacidad de energía

en los dispositivos, lo que ha motivado el desarrollo y la definición de los objetivos del trabajo de tesis.

- Capítulo 2 - Consumo de Energía en Redes Ad Hoc: Consideraciones del Medio Inalámbrico

Este capítulo presenta un análisis del consumo de energía en el medio inalámbrico acorde al principio de operación de la interfaz de radio. En particular, se realiza un estudio de los estados de operación de la tarjeta inalámbrica en escenarios con diferentes condiciones de interferencia. El estudio evalúa el impacto de la característica compartida del medio inalámbrico sobre el incremento del gasto de energía demandado por la interfaz de radio. Adicionalmente, se realiza un análisis de diferentes trabajos y enfoques de optimización propuestos en la literatura. El presente capítulo está relacionado con el objetivo **Q1**.

- Capítulo 3 - OLSR Estratégico: Un Protocolo de Enrutamiento Cross-layer para Redes Ad hoc.

En este capítulo se propone el mecanismo OLSR Estratégico (SOLSR), el cual consiste en un nuevo protocolo de enrutamiento que aplica un esquema *cross-layer* para optimizar el consumo de energía en redes inalámbricas ad hoc. El mecanismo permite la conformación de rutas acorde a la capacidad de energía y la distribución de los nodos en un escenario, previniendo la pérdida de conectividad en la red. En particular, se presenta una descripción detallada de la operación y arquitectura de SOLSR, así como la evaluación de su rendimiento comparado con soluciones similares. El capítulo está relacionado con el objetivo **Q2**.

- Capítulo 4 - Evaluación de SOLSR mediante un Testbed

Este capítulo presenta la evaluación del mecanismo SOLSR en condiciones realistas de operación. El análisis abarca la implementación de un *testbed* conformado por un conjunto de nodos ad hoc, el desarrollo de un sistema de medición del consumo de energía, la implementación del algoritmo de enrutamiento, así como el desarrollo de una herramienta para el control y configuración remota de los experimentos. Finalmente, se presentan los resultados que evalúan el rendimiento del mecanismo SOLSR en cuanto a parámetros de energía y calidad en la transmisión del tráfico de vídeo. El capítulo está relacionado con el objetivo **Q3**.

- Capítulo 5 – Despliegue y Evaluación de Redes Inalámbricas Ad Hoc Multi-hop

Este capítulo presenta el despliegue de aplicaciones basadas en redes inalámbricas ad hoc para el soporte de conectividad. En particular, se presenta un estudio de viabilidad para la implementación de un sistema de vídeo portero inalámbrico sobre un escenario multi-salto, así como el diseño e implementación de una arquitectura prototipo para la

vídeo monitorización de entornos agrícolas. El capítulo está relacionado con el objetivo **Q4**.

Adicionalmente, el presente trabajo de tesis ha permitido el desarrollo de publicaciones en revistas científicas, presentaciones en conferencias y capítulos de libros. En el Apéndice A se describe el listado detallado de las publicaciones alcanzadas a partir del trabajo desarrollado.

Capítulo 2

Consumo de Energía en Redes Ad Hoc: Consideraciones del Medio Inalámbrico

Los nodos que conforman una red ad hoc usualmente están provistos de baterías como fuente de alimentación de energía, lo que ocasiona una autonomía de funcionamiento muy limitada. Tal restricción tiene un impacto negativo sobre la conectividad y la capacidad para garantizar una adecuada calidad de servicio en las aplicaciones. En condiciones reales de operación, la planificación del gasto de energía constituye el principal desafío para el despliegue de este tipo de redes. Sin embargo, las tareas de gestión resultan de gran complejidad, especialmente debido a la operación distribuida. Acorde a tal característica, un análisis adecuado del consumo requiere una comprensión de la demanda considerando la naturaleza compartida del entorno inalámbrico. En este capítulo se realiza un estudio acerca de los principales factores que incrementan el gasto de energía en el medio inalámbrico y que guardan relación con el principio de funcionamiento de la interfaz de radio. Los resultados han sido obtenidos a partir de experimentos desarrollados en simulaciones sobre diferentes escenarios, así como a través de mediciones realizadas con equipos. Finalmente, se presenta una clasificación de las principales soluciones de optimización propuestas en la literatura.

2.1. Características Operativas de la Interfaz de Radio

Los dispositivos con capacidad para conformar una red en modo ad hoc presentan una amplia diversidad en cuanto a sus componentes de *hardware* y *software*, algunos ejemplos representativos de potenciales nodos consisten en ordenadores portátiles, *tablets*, *smartphones*, sistemas embebidos, microordenadores, etc. Dado el conjunto heterogéneo, la demanda de energía depende de las capacidades disponibles en cada dispositivo (monitor, periféricos, CPU, batería, tarjeta de red, etc.), lo que dificulta las tareas de caracterización. No obstante, entre los elementos de análisis, la interfaz de radio demanda un porcentaje considerable de la energía disponible. Dicha proporción es dominante en especial sobre dispositivos móviles y ordenadores de tamaño reducido, como se discute en [37]. Adicionalmente, en [38] se presentan resultados de medidas experimentales que describen un incremento significativo del gasto de energía sobre ordenadores embebidos debido a la interfaz inalámbrica. Para verificar dicho comportamiento se desarrolló un estudio con el objetivo de caracterizar los niveles de consumo de corriente sobre un nodo ad hoc conforme se incluyen diferentes capacidades (periféricos). En el experimento se empleó un ordenador de placa reducida ó SBC (*Single Board Computer*), una tarjeta inalámbrica (IEEE 802.11) así como un conjunto de sensores como periféricos (GPS, un sensor de variables ambientales y una *webcam*), los dispositivos empleados se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Componentes del Nodo Ad hoc

Dispositivo	Descripción / Modelo
SBC	Raspberry Pi B+ [39]
Tarjeta IEEE 802.11	Awus036nh [40]
GPS	<i>Ultimate</i> v3 [41]
Sensor temperatura, humedad	BME280 [42]
<i>WebCam</i>	5.7MP-HD720p

Los valores de consumo promedio han sido obtenidos a partir de un proceso de muestreo de la corriente demandada, para cada una de las condiciones de operación definidas en el experimento. Los resultados se presentan en la Figura 2.1. Como se puede apreciar, los resultados describen un consumo promedio de la plataforma (SBC) de 224mA. Posteriormente, la inclusión de la tarjeta inalámbrica (sin la generación de tráfico), así como el conjunto de sensores, ocasiona respectivamente una demanda promedio de 445mA y 526mA. En cuanto a la generación de tráfico a partir de la información capturada por los sensores (datos y vídeo), resulta en un incremento del consumo a un valor aproximado de 687mA. En particular, se resalta los incrementos notables ocasionados por la inclusión y operación de la interfaz inalámbrica con niveles

de consumo que duplican las condiciones previas. Dicho comportamiento se refleja en la tendencia del tiempo de operación previsto para el nodo, incluida sobre la Figura 2.1.

La gráfica ha sido obtenida considerando una capacidad de energía usual en las baterías de dispositivos móviles (3500mAh). Como se aprecia, la tendencia describe una reducción apreciable de la autonomía de operación, nuevamente asociada a la interfaz inalámbrica. Específicamente, se obtienen valores aproximados de 7.8 horas al incluir la tarjeta inalámbrica y 5 horas con la generación de tráfico. Dichos resultados representan respectivamente el 50% y el 32% del tiempo máximo de funcionamiento previsto al operar únicamente la plataforma SBC (aproximadamente 15.5 horas).

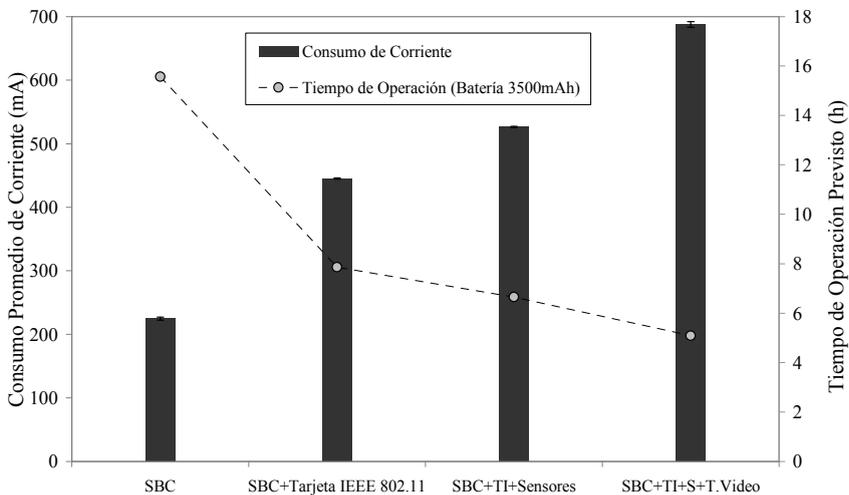


Figura 2.1 Medición experimental del consumo de corriente en un nodo

En cuanto a la variación obtenida en los niveles de consumo de corriente durante la inclusión y posterior operación de la tarjeta inalámbrica, tal comportamiento describe una demanda base de energía, así como incrementos considerables relacionados con el funcionamiento de la interfaz. En tal sentido, resulta adecuado un análisis detallado de los distintos estados asociados a una tarjeta inalámbrica, así como las condiciones requeridas para la operación en los mismos. En la Figura 2.2 se presenta un diagrama simplificado que modela las funciones de análisis ejecutadas en una interfaz inalámbrica y que dan lugar a los distintos estados de operación.

La descripción del diagrama puede ser realizada a partir de la función CS/CCA (*Carrier Sense/Clear Channel Assesment*), implementada en la capa física. El objetivo de dicha operación es analizar las señales existentes en el medio. En concreto, cuando una señal es detectada por la subcapa física PMD (*Physical Medium Dependent*), su nivel de potencia (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) es comparado con un valor umbral (*CCA_Threshold*). Si el nivel de potencia es superior al umbral, la función CS/CCA

declara al medio como *Busy*. A partir de la notificación, se inicia un estudio detallado de la señal detectada. Específicamente, la función *Signal_Detection* analiza una porción de la señal denominada preámbulo, la cual es generada por la capa PLCP (*Physical Layer Convergence Protocol*). Este conjunto de *bits* también denominados *training bits*, permiten obtener una estimación del canal, así como una valoración de la señal frente al ruido de *background*. Si la señal es declarada como válida, a continuación se realiza un análisis del *header* PLPC. Dicha sección contiene información acerca de la tasa de transmisión, longitud de los datos y tipo de modulación, parámetros requeridos para la correcta sincronización del receptor. Si el proceso de sincronización se realiza con éxito, la interfaz conmuta al estado de recepción para iniciar la decodificación de los datos. Nótese que el proceso descrito es desarrollado a nivel de capa física y por tanto en esta instancia no se realiza un análisis acerca de la dirección de destino de los datos.

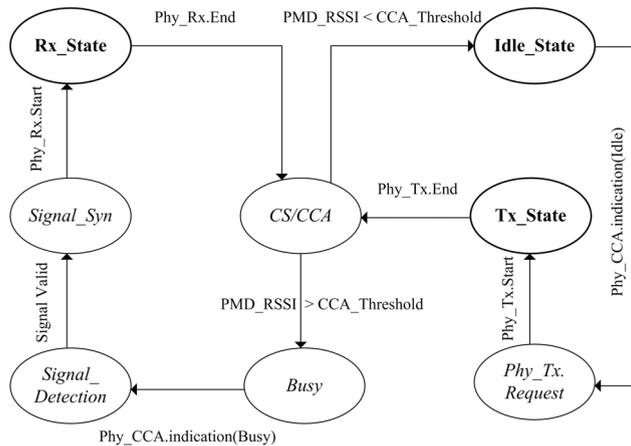


Figura 2.2 Diagrama de estados de operación para una interfaz IEEE 802.11

Retomando la función CS/CCA, si el nivel de potencia de la señal detectada es inferior al valor umbral, el medio es declarado como *Idle*, lo que representa la disponibilidad para la transmisión de datos. Dicho análisis da lugar al estado de operación que lleva el mismo nombre (*Idle_State*). A continuación, en caso de existir datos generados por las capas superiores, la capa MAC (*Medium Access Control*) considera la notificación del medio como *Idle* y realiza una solicitud de transmisión (*Phy_Tx_Request*). Tales condiciones permiten que la interfaz conmute hacia el estado de transmisión. En tal sentido, para el envío de los datos se requiere que la capa PLCP agregue el preámbulo y el *header* correspondiente para la correcta detección y sincronización de la señal con el dispositivo en recepción.

En cuanto al modo de operación denominado *sleep*, usualmente considerado como un estado adicional, consiste en una desconexión parcial de la tarjeta inalámbrica durante períodos definidos, mientras un dispositivo coordinador almacena los datos que le pudiesen haber sido enviados durante dicho intervalo. Por consiguiente, resulta más

adecuado catalogarlo como un mecanismo de gestión. Un análisis más detallado acerca de las funciones y estados de operación de la interfaz de radio se presenta en el documento del estándar IEEE 802.11 [43].

Por otra parte, la operación de la tarjeta inalámbrica en Transmisión (Tx), Recepción (Rx) e *Idle*, demanda diferentes niveles de energía. Los valores exactos de corriente, así como las diferencias de proporción en el consumo, son dependientes del *hardware* y no siempre se encuentran disponibles en las especificaciones técnicas proporcionadas por un fabricante. No obstante, en la Tabla 2.2, se presenta algunos ejemplos de los niveles de intensidad para diferentes modelos de tarjetas inalámbricas.

Como se puede apreciar, en todos los casos el estado de transmisión demanda un mayor valor de corriente, seguido de la operación en recepción y finalmente el estado *Idle*. El consumo resultante dependerá del tiempo que la interfaz deba permanecer en cada estado. En particular, una constante operación en transmisión y recepción resultará en un mayor gasto de energía.

Tabla 2.2 Niveles de Consumo de Corriente para Diferentes Modelos de Tarjetas Inalámbricas

Marca	Parámetros Descriptivos			Consumo de Corriente (mA)			
	Modelo	Conector	Estándar	Tx	Rx	Idle	Sleep
Cisco	Aironet [44]	PCI	a/b/g	554	318	203	-
Cisco	AE1200[45]	USB	b/g/n	278	111	37	37
Dell	1450 [46]	USB	a/b/g	433	402	200	2,5
Dell	1350 [47]	mini PCI	b/g	303	242	224	6
Dell	1450 [47]	mini PCI	a/b/g	363	303	224	6
D-Link	DWA510[48]	PCI	b/g	450	260	15	-
HP	HN210W [49]	USB	b	250	100	30	-
Intel	7260 [50]	PCIe	a/b/g/n	606	485	30	23
Intel	3945 [51]	PCIe	a/b/g	545	424	45	9

2.2. Consumo de Energía en el Medio Inalámbrico

El entorno inalámbrico constituye un factor clave de análisis acerca del consumo de energía. Como consecuencia de la característica compartida del medio, los sistemas de comunicación inalámbricos usualmente presentan zonas de cobertura comunes entre los nodos. Dichas zonas de interferencia pueden resultar en un consumo considerable de los recursos de energía. El comportamiento está relacionado con el principio de funcionamiento de la interfaz de radio, donde la transmisión y recepción son los estados que mayor energía demandan.

Acorde al análisis previo, para conmutar a los estados de transmisión o recepción, la interfaz de radio verifica el nivel de potencia de las señales existentes en el medio. El mecanismo ocasiona que, en zonas de interferencia comunes, la tarjeta inalámbrica conmute al estado de recepción debido a la detección del umbral de potencia requerido, aun cuando un dispositivo no sea el objetivo de los datos. Dicho efecto denominado *overhearing* genera un incremento en el gasto de energía debido a la mayor frecuencia de operación en modo recepción. En la Figura 2.3, se presenta un diagrama representativo para este comportamiento, además se resaltan los distintos estados de operación considerando una zona de interferencia.

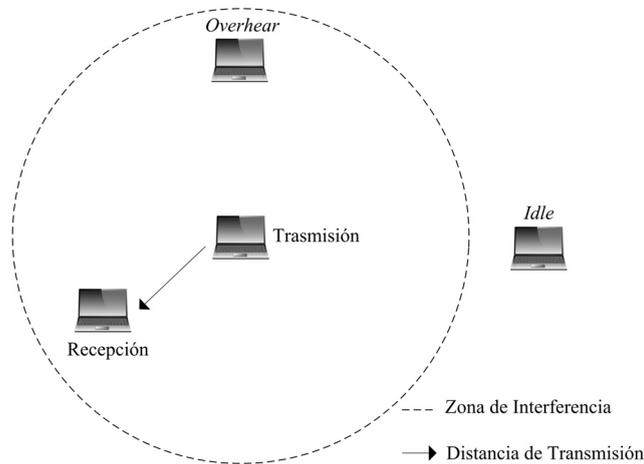


Figura 2.3 Efecto *overhearing* y estados de operación de la interfaz de radio [52]

Los escenarios caracterizados por una alta densidad de dispositivos son más propensos al agotamiento de energía debido al efecto *overhearing* [53]. La demanda de tráfico es un factor adicional que maximiza el gasto de energía derivado de una operación innecesaria en modo recepción [54], [55]. Adicionalmente, las zonas de interferencia con una significativa densidad de nodos, presentan un aumento en la tasa de pérdida de paquetes como resultado de la intensa contienda por el medio y por tanto la mayor probabilidad de colisiones. Tal efecto ocasiona un alto número de intentos de transmisión, lo que contribuye a incrementar el gasto de energía [56].

En los apartados 2.2.1 y 2.2.2, se presentan un conjunto de experimentos diseñados con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la interfaz de radio, bajo diferentes condiciones de interferencia. Los estudios se enfocan en determinar la susceptibilidad de la tarjeta inalámbrica al incremento de los estados de transmisión y recepción, así como en el análisis del gasto de energía asociado. Los experimentos han sido desarrollados empleando el simulador NS3 [57]. En la Tabla 2.3, se describen las métricas disponibles en el simulador [58], las mismas que han sido empleadas en los estudios considerando el diagrama de estados presentado en la Figura 2.2.

Tabla 2.3 Métricas Descriptivas de los Estados Operativos de la Interfaz de Radio en el Simulador NS3

Métrica	Descripción
Phy Tx Begin (PTB)	Inicio de la transmisión de un paquete en el canal
Phy Tx End (PTE)	La transmisión de un paquete ha sido completada
Phy Rx Begin (PRB)	Inicio de la recepción de un paquete
Phy Rx End (PRE)	Se ha completado la recepción de un paquete
Mac Tx Data Failed (MTDF)	La transmisión de un paquete por la capa MAC ha fallado

2.2.1. Análisis de la interfaz de radio en zonas de interferencia

Para el análisis de los estados de operación de la interfaz de radio, en primer lugar se realizó un estudio con el objetivo de establecer la distancia de interferencia entre dos nodos. Los parámetros configurados en la simulación, se especifican en la Tabla 2.4. En cuanto a las características de la interfaz, se emplearon los datos técnicos de una tarjeta inalámbrica reciente, que incorpora los estándares a/b/g/n [50] (Tabla 2.2).

En el estudio se empleó la métrica *Phy Rx End*, que describe la recepción exitosa de un paquete. Como tráfico se empleó una secuencia de vídeo de 300 segundos de duración, la secuencia se conformó concatenando un conjunto de ficheros de vídeo (.yuv), disponibles en [59] y [60], hasta obtener la duración indicada. El formato de los vídeos seleccionados es de 352 x 288 *pixels*. La secuencia resultante fue codificada empleando el estándar H.264 [61], mediante la especificación de un *bit rate* promedio de 500 kbps, para lo cual se empleó la herramienta FFmpeg [62]. En la Tabla 2.5 se detallan las características del vídeo definido para la simulación.

Tabla 2.4 Parámetros de Simulación para la Caracterización de la Distancia de Interferencia

Parámetro	Descripción/Valor
Tarjeta Inalámbrica	Intel 7260 [50]
Tasa de envío	54 Mbps
Sensibilidad	-74 dBm
Potencia de Transmisión	0 dBm

Tabla 2.5 Parámetros Característicos del Vídeo

Parámetro	Descripción/Valor
Ficheros originales	Formato yuv
Secuencias empleadas	Bus [59], Mobile [59], Crew [60], Soccer [60]
Resolución	CIF (352 x 288)
Frames por segundo	30
Codificación	H.264
Bit rate (promedio)	500 kbps
Tamaño de GOP (<i>Group of Pictures</i>)	30
Duración	300 segundos
Tamaño Vídeo	20.3 MB (23460 paquetes)

En la Figura 2.4 se presentan los resultados del estudio. Como se puede apreciar, la máxima distancia obtenida, para una recepción exitosa de datos es de aproximadamente 28m. Posteriormente, la gráfica presenta una rápida degradación en cuanto al porcentaje de paquetes en el nodo receptor, el mismo que es prácticamente nulo a partir de los 30m.

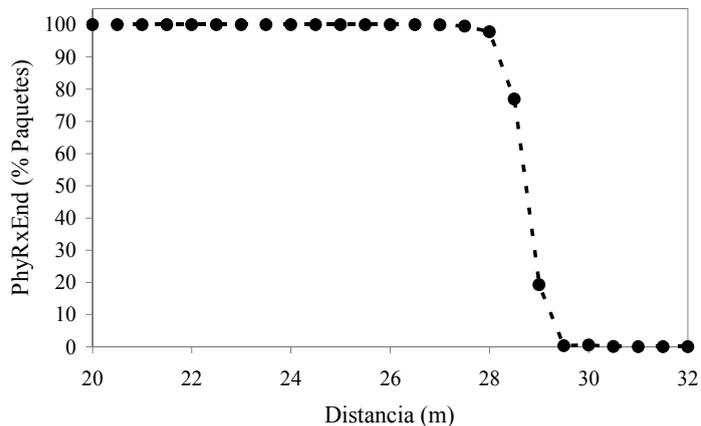


Figura 2.4 Tasa de recepción de paquetes de acuerdo a la distancia de transmisión

A continuación, considerando la distancia para una transmisión efectiva (< 28m) de los datos, se diseñó un estudio empleando conjuntos de nodos transmisores y receptores, con el objetivo de evaluar el impacto del intercambio de tráfico sobre un dispositivo de prueba ubicado en el escenario, el mismo que no constituye la fuente ni el destino del

tráfico. En concreto, se definieron tres casos para el análisis, como se puede apreciar en las Figuras 2.5 (a), 2.5 (b) y 2.5 (c), con 1, 2 y 6 pares de nodos respectivamente.

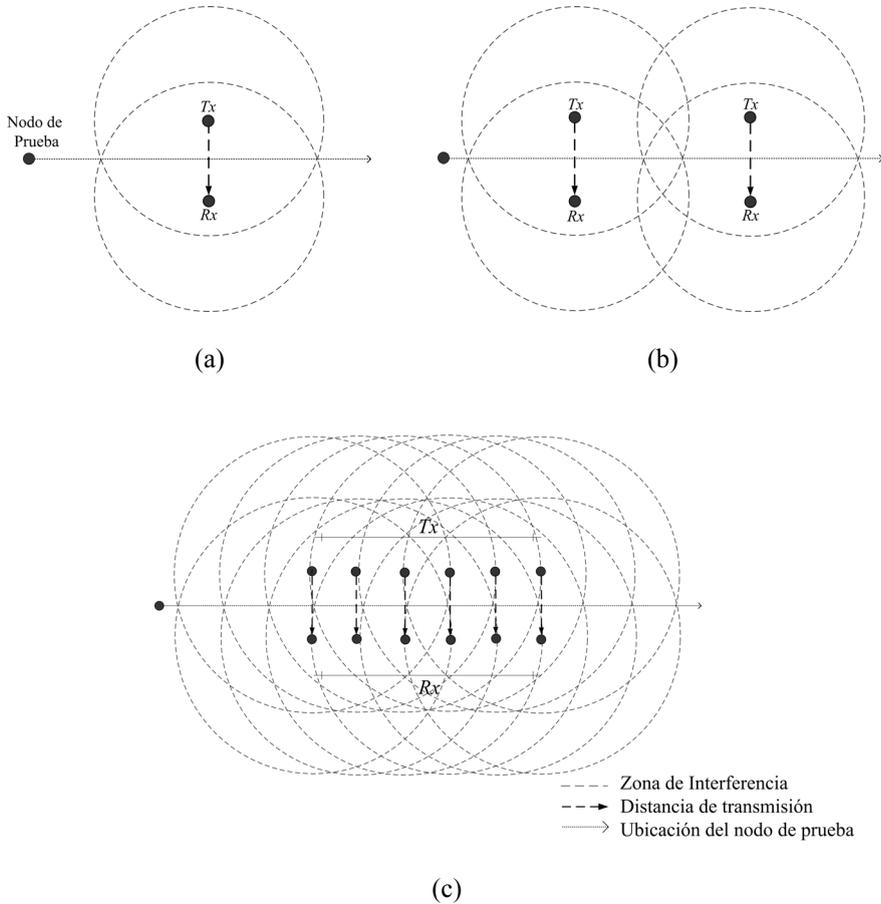


Figura 2.5 Escenarios para el análisis del efecto *overhearding* sobre un nodo de prueba bajo diferentes niveles de interferencia: (a) 2 nodos, (b) 4 nodos, (c) 12 nodos

El dispositivo de prueba ha sido ubicado intencionalmente en diferentes posiciones a lo largo y fuera de las zonas de interferencia de los nodos que intercambian tráfico. Los parámetros empleados en la simulación corresponden a los datos presentados en la Tabla 2.4 y la Tabla 2.5. En el estudio se empleó la métrica *Phy Rx Begin* (Tabla 2.3), la misma que contabiliza la detección de un paquete por la interfaz de radio, proceso que da lugar al inicio del estado de recepción. El total de paquetes detectados en cada ubicación se evalúa al final del intercambio de tráfico (300 segundos). Por lo tanto, la métrica permite dimensionar el efecto *overhearding* generado sobre el nodo de prueba, los resultados del estudio se presentan en la Figura 2.6.

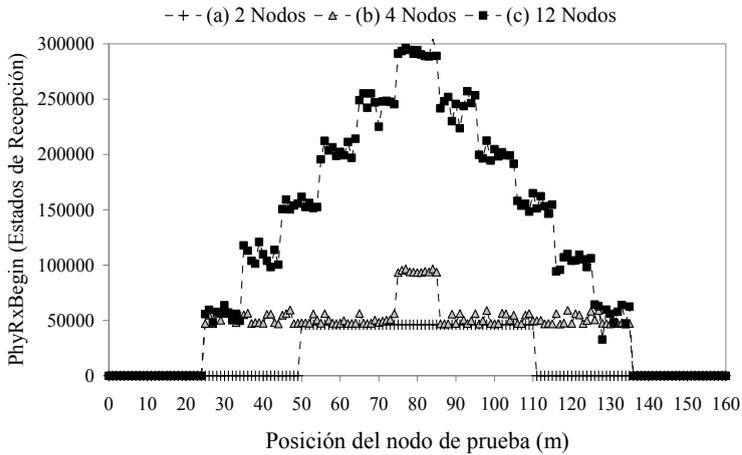


Figura 2.6 Paquetes detectados por el nodo de prueba debido al efecto *overhearing*

Como se puede apreciar, existe una variación significativa en la cantidad de paquetes detectados por el nodo de prueba de acuerdo a su ubicación en una zona de tráfico específica. Para el caso con dos nodos que intercambian tráfico, correspondiente al escenario de la Figura 2.5 (a), el número de paquetes detectados es el resultado de un único flujo de tráfico (transmisiones, retransmisiones, mensajes ACK), lo que ocasiona un comportamiento uniforme mientras el nodo se encuentra en la zona de interferencia (aprox. 50m-110m). En cuanto a los resultados correspondientes al escenario de la Figura 2.5 (b), en este caso existen dos niveles de interferencia correspondientes a un flujo único de datos con un comportamiento similar al caso previo, así como una zona de interferencia de menor longitud (aprox. 75m-85m) con dos flujos de tráfico, lo que duplica la cantidad de paquetes detectados. Nótese que los estados de recepción son generados a pesar de que el nodo objetivo del análisis no participa en el intercambio de datos. Dicho efecto es crítico conforme se incrementa el número de nodos, como se puede apreciar, en los resultados del escenario correspondiente a la Figura 2.5 (c), conformado por doce nodos. En este caso, la proximidad entre los dispositivos que generan tráfico resulta en un mayor número de niveles de interferencia. En particular, cuando el nodo de prueba se localiza en la zona central del escenario (75m-85m) se produce un incremento en un factor de seis en cuanto al número de estados de recepción, debido a que en dicha zona es posible detectar los paquetes correspondientes a todos los flujos de tráfico.

Por otra parte, a diferencia del comportamiento uniforme obtenido para el caso de dos nodos, cuando se intensifica la interferencia se aprecian fluctuaciones en el número de paquetes detectados por el nodo de prueba, de lo que se puede inferir variaciones en la cantidad de paquetes transmitidos en el escenario. Para analizar este comportamiento, a continuación se realizó un estudio acerca del número de estados de transmisión así como de los reintentos de envío contabilizados en este caso sobre uno de los nodos transmisores en la zona central del escenario de la Figura 2.5 (c), conforme se

incrementa el número de dispositivos vecinos que intercambian simultáneamente tráfico, hasta conformar el total de seis pares de nodos. Los resultados se presentan en la Figura 2.7. Para el análisis, se emplearon las métricas *Phy Tx Begin* (PTB) y *Mac Tx Data Failed* (MTDF), descritas previamente en la Tabla 2.3. En particular, la métrica *Phy Tx Begin* proporciona información acerca del total de estados de transmisión, mientras que la métrica *Mac Tx Data Failed* contabiliza el número de reintentos de envío por paquete. Además, se empleó el mismo flujo de tráfico de los experimentos previos, correspondiente a la secuencia de vídeo de 300 segundos (Tabla 2.5).

Como se puede apreciar, las gráficas describen una tendencia de incremento en la cantidad de estados de transmisión sobre el nodo analizado, conforme es mayor el número de elementos vecinos que intercambian tráfico. El comportamiento es resultado de la pérdida de efectividad en la transmisión de los datos debido al incremento paulatino de la contienda por el acceso al canal, por lo que se requiere un mayor número de intentos de envío. Específicamente, la variación en el número de reintentos de transmisión entre los casos de cuatro y doce nodos en el escenario, es significativa, con valores que representan respectivamente el 1.2% y el 11% del total de estados de transmisión en dichas condiciones.

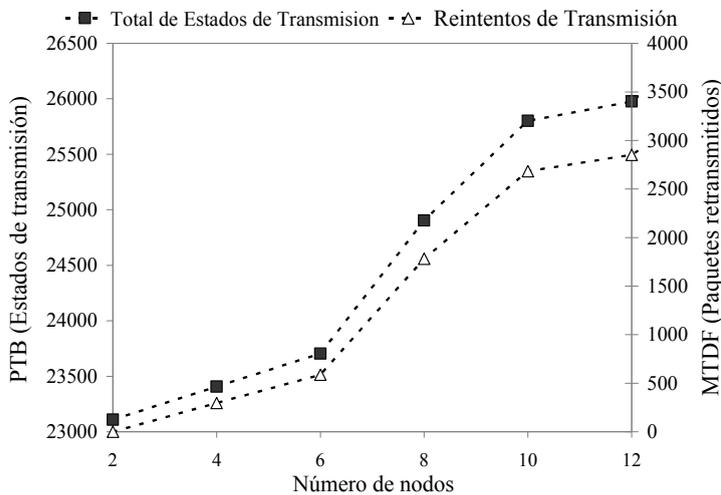


Figura 2.7 Análisis del número de estados de transmisión según el número de nodos vecinos en la zona de interferencia

Adicionalmente, para los escenarios presentados en la Figura 2.5, se realizó un estudio acerca del impacto del efecto *overhearing* sobre el gasto de energía en el nodo de prueba. En cuanto al análisis, el simulador NS3 implementa un modelo de consumo [63] acorde a la permanencia de la tarjeta en los diferentes estados de operación, como se describe en (1):

$$E_c(t = T) = \sum_{i=1}^T V \cdot I_i \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad [J] \quad (1)$$

Donde E_c es el gasto de energía en julios durante un tiempo T , I es el valor de intensidad expresado en miliamperios de acuerdo al estado de operación (Tx, Rx e Idle) en el intervalo $t_i - t_{i-1}$ y V es el voltaje requerido para el funcionamiento de la tarjeta inalámbrica (usualmente 3.3v/5v). Los parámetros de energía empleados en la simulación se describen en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Parámetros de Energía para el Análisis del Efecto *Overhearing*

Parámetro	Descripción/Valor
Energía inicial (nodo de prueba)	100 julios
Consumo de corriente [50]	$I_{Tx} = 606 \text{ mA}$ $I_{Rx} = 485 \text{ mA}$ $I_{Idle} = 30 \text{ mA}$
Voltaje de operación [50]	3.3 V

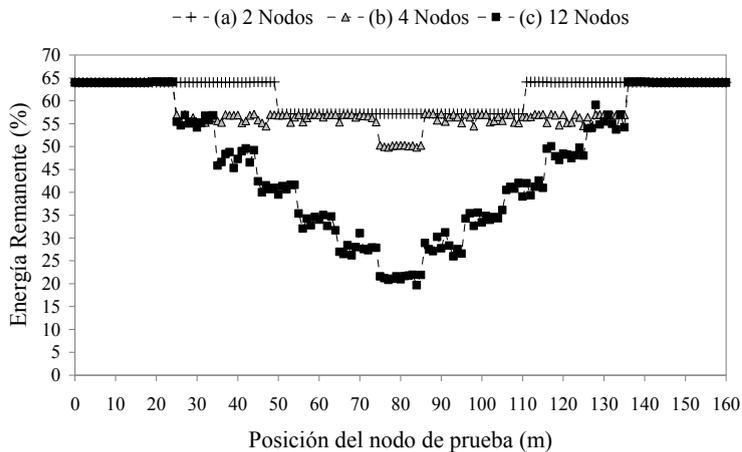


Figura 2.8 Energía residual en el nodo de prueba según su ubicación en las zonas de interferencia

Los resultados del estudio se presentan en la Figura 2.8. Las gráficas describen el nivel de energía residual en el nodo de prueba acorde a su ubicación y condiciones de interferencia. Los niveles de energía remanente en cada posición, son extraídos una vez han finalizado los flujos de tráfico (300 segundos). En particular, para las ubicaciones externas a las zonas de interferencia, se puede apreciar que el nivel de energía final es el mismo para todos los casos (aprox. 65% de la energía inicial definida). Este

comportamiento se debe a que, en dichas zonas, el nodo de prueba no detecta señales con un nivel de potencia válido para iniciar el estado de recepción y por tanto permanece en modo *Idle*, ocasionando un nivel base de consumo en la tarjeta. En cuanto a la ubicación en el interior de las zonas de interferencia, las gráficas describen una tendencia que se corresponde con la evaluación previa sobre el efecto *overhearing* (Figura 2.6). Específicamente, para el caso de dos nodos el nivel de energía disponible se reduce hasta un 57% de la capacidad inicial configurada, como resultado de la detección de paquetes y en concreto debido a la mayor demanda de corriente para operar en el estado de recepción comparado con el modo *Idle* (Tabla 2.6). Para el caso de cuatro nodos, el nivel adicional de interferencia en la zona central del escenario, ocasiona la reducción de la energía disponible hasta un 50% del valor inicial.

Finalmente, para el caso de doce nodos, conforme se intensifican los niveles de interferencia, el agotamiento de energía resulta dramático. Específicamente, para la ubicación central del escenario (75m-85m), el nivel de energía remanente se reduce en promedio a un 20% de la capacidad original.

2.2.2. Análisis en un entorno multi-hop con diferentes niveles de conectividad

Los estudios presentados revelan la importancia del número de dispositivos vecinos en el incremento del consumo de energía. Dicho comportamiento sugiere que la ubicación de un dispositivo en la red es un factor a considerar en la planificación del gasto energético. En tal sentido, a diferencia de los escenarios analizados al momento, en un entorno *multi-hop* los nodos intermedios presentan diferentes niveles de conectividad de acuerdo a la cantidad de dispositivos vecinos a su alcance. Por tanto, el número de nodos afectados por los procesos de retransmisión y el efecto *overhearing* dependerá de la conformación de las rutas para el envío de datos.

En este apartado, se desarrolló un estudio con el objetivo de analizar el efecto de la distribución del tráfico sobre el gasto de energía en un entorno *multi-hop*. Para la evaluación se diseñó el escenario de la Figura 2.9. En la Figura 2.9 (a) se presenta la distribución de los nodos. En particular, la ubicación de los dispositivos tiene por objetivo alcanzar diferentes niveles de conectividad sobre el escenario. En el diagrama se ha resaltado la relación de conectividad entre los nodos, así como el número de elementos vecinos. Además, se definió a los nodos cero y uno respectivamente como origen y destino de los datos. En tal sentido, en la Figura 2.9 (b), se detallan las rutas disponibles para la distribución del tráfico. Como se puede apreciar, existen siete rutas alternativas considerando una distancia de cuatro saltos. Los nodos 2 y 3, son los elementos candidatos a primer salto, los nodos 4, 5, 6 y 7 constituyen las opciones para el segundo salto y finalmente los dispositivos 8 y 9 representan las alternativas para el tercer salto. En el estudio se empleó el protocolo OLSR estándar (RFC 3626) [29], que aplica la métrica de número de saltos para el cálculo de las rutas.

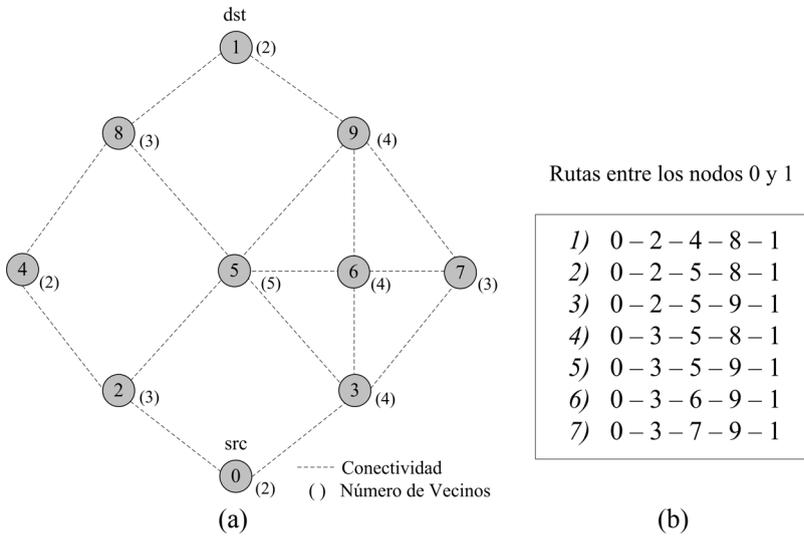


Figura 2.9 Escenario *multi-hop*. (a) Ubicación y relación de conectividad entre los nodos. (b) Rutas alternativas entre el nodo 0 y el nodo 1

Los parámetros de simulación se presentan en la Tabla 2.7. Como tráfico se empleó la secuencia de vídeo del estudio previo, detallada en la Tabla 2.5. Específicamente, se definió un total de 25 réplicas o iteraciones y un intervalo de 60 segundos entre cada iteración, lo que representa un tiempo total de operación de los nodos de 2.5 horas. En cuanto al nivel de energía se asignó una capacidad inicial de 10000 *julios* en cada dispositivo. A continuación, se describe la evaluación realizada.

Tabla 2.7 Parámetros de Simulación para el Escenario *Multi-hop*

Parámetro	Descripción/Valor
Tarjeta Inalámbrica	Intel 7260 [50]
Tasa de envío	54 Mbps
Sensibilidad	-74 dBm
Potencia Transmisión	0 dBm
Traffic Video	Duración: 300 segundos Bit rate: 500 kbps (promedio) Iteraciones: 25 Intervalo: 60 segundos
Traffic Routing (OLSR)	Hello: 2 segundos TC: 5 segundos
Energía Inicial	10000 julios \approx 842 mAh

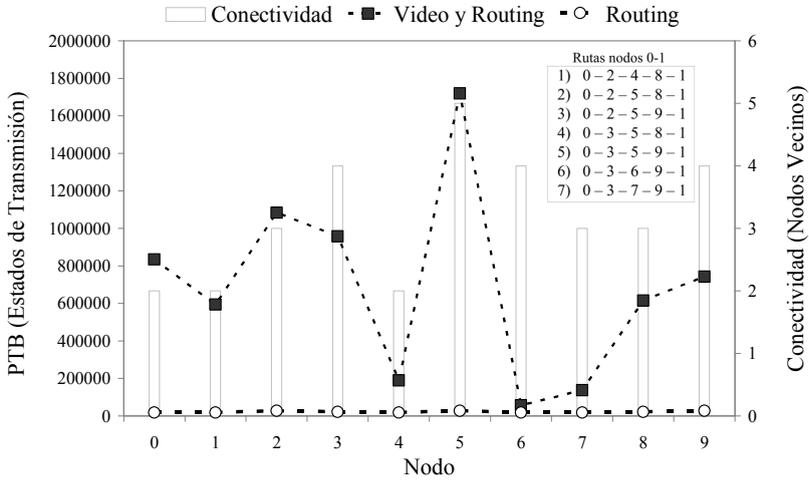


Figura 2.10 Distribución del tráfico según el número de estados de transmisión en cada nodo

En la Figura 2.10, se presentan los resultados del total de estados de transmisión contabilizados en cada nodo, correspondiente a los flujos de vídeo en conjunto con el intercambio de información de *routing*. Adicionalmente, se especifica los niveles de conectividad para cada elemento y se resaltan las rutas disponibles, descritas previamente en la Figura 2.9 (b). La gráfica obtenida proporciona información sobre la tendencia en la conformación de las rutas. Un mayor número de estados de transmisión indica la selección con mayor frecuencia de un nodo como próximo salto para el reenvío de los datos. Por consiguiente, a partir de los resultados se puede inferir un dominio en el establecimiento de trayectorias a través del nodo 5, el cual presenta el mayor nivel de conectividad en el escenario y, por tanto, integra la mayor parte de las posibles rutas entre los nodos fuente y destino. En cuanto a los elementos restantes, acorde al número de estados de transmisión, existe una mayor tendencia en la selección de la ruta número tres, la cual emplea el nodo 2 como primer salto y el nodo 9 como tercer salto. Adicionalmente, el flujo del tráfico se establece con una frecuencia algo menor a través de la ruta número cuatro, conformada por los nodos 3 y 8 que constituyen los elementos alternativos para el primer y tercer salto respectivamente. Por otra parte, el número de estados de transmisión detectados sobre los nodos 4, 6 y 7 indica una participación considerablemente menor de dichos elementos en el intercambio de tráfico.

Adicionalmente, con el objetivo de evaluar la proporción del tráfico de *routing* (transmisión de paquetes *Hello* y *Topology Control*) frente al tráfico total, se replicó la operación del escenario sin las iteraciones de la secuencia de vídeo. Los resultados obtenidos han sido incluidos en la Figura 2.10. Como se puede apreciar, el número de estados de transmisión derivados de la operación del protocolo de enrutamiento es considerablemente inferior al valor total. Específicamente, para el caso de los

dispositivos con mayor frecuencia de operación (nodos 2, 5 y 9), el tráfico de *routing* representa únicamente el 2.6%, 1.6% y 3.8%, respectivamente del número total de estados de transmisión generados en dichos elementos.

Por otra parte, en cuanto al mayor número de estados de transmisión detectados en los dispositivos intermedios 2, 3 y 5, comparado con el nodo fuente de los datos (nodo 0), dicho comportamiento es ocasionado principalmente por los procesos de retransmisión de paquetes (el estándar IEEE 802.11, define un número máximo de intentos de envío igual a siete). En tal sentido, en la Figura 2.11, se presenta una evaluación de las retransmisiones sobre cada nodo. Como se aprecia, los resultados se corresponden con el patrón del tráfico en la Figura 2.10. El mayor número de reintentos de envío en los nodos 2, 3 y en especial sobre el nodo de mayor conectividad (nodo 5), ocasiona un total de estados de transmisión sobre dichos nodos, que supera al del nodo origen de los datos.

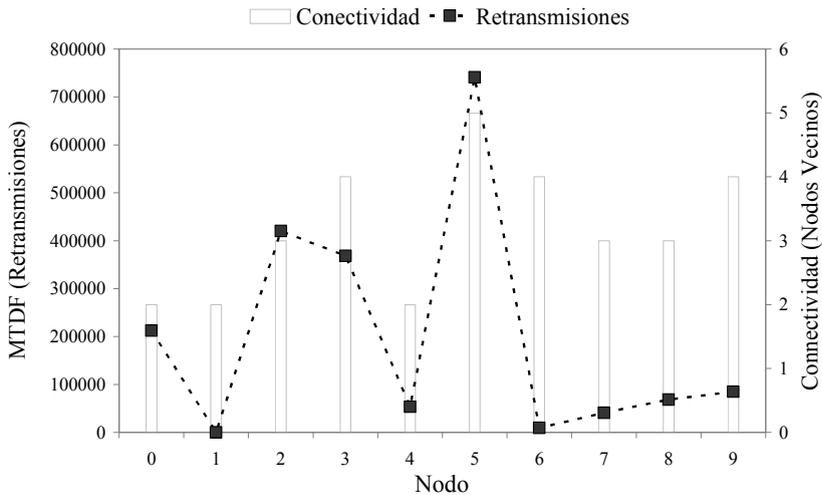


Figura 2.11 Evaluación de los reintentos de envío en cada nodo

Continuando con el análisis, a continuación se realizó una evaluación de los estados de recepción contabilizados en cada elemento. En la Figura 2.12, se presentan los resultados del estudio. Como se puede apreciar, los nodos intermedios experimentan un número de estados de recepción incluso superior al nodo destino de los datos. Dicho comportamiento tiene relación con la ubicación de un dispositivo en el escenario, la tendencia en la conformación de las rutas, así como la sobre detección de paquetes durante los procesos de reenvío en cada salto. En particular, el mayor establecimiento de las rutas a través del nodo 5 ocasiona un incremento significativo del efecto *overhearing* debido al mayor número de dispositivos vecinos a su alcance (nodos 2, 3, 6, 8 y 9). A su vez, el nodo 5 también resulta afectado por su nivel de conectividad, con una proporción de paquetes detectados cercano al triple de los datos obtenidos en el nodo receptor (aproximadamente 2.7 veces). El efecto es apreciable incluso para los

dispositivos con menor participación en la transmisión de los flujos, como es el caso del nodo 6 (aprox. 2.5 veces el número de paquetes detectados por el nodo 1), afectado principalmente por el reenvío de datos a través de los nodos 3, 5, 7 y 9.

Para el caso de los nodos 4 y 7, el factor de incremento en el número de estados de recepción es menor, aproximadamente 1.8 y 1.9 veces, comparado con el nodo de destino y depende principalmente de los estados de transmisión en los nodos 2-8 y 3-6-9, respectivamente. Una cantidad adicional de estados de recepción es posible en el escenario debido al comportamiento variable en la distancia límite de conectividad, especialmente entre los nodos 4 y 7 con respecto al nodo 5. Adicionalmente, de forma independiente a la ruta seleccionada, los nodos 2 y 3 detectan continuamente los flujos iniciales de datos a partir del nodo transmisor (nodo 0). El comportamiento se replica cuando la ruta es conformada a través del nodo 5. Como resultado, tales dispositivos presentan una cantidad muy similar de paquetes detectados (aprox. 2.2 veces el número de paquetes en 1). Un efecto similar se presenta sobre los nodos 8 y 9 (en promedio un factor de 1.6) en este caso debido a la operación del nodo 5.

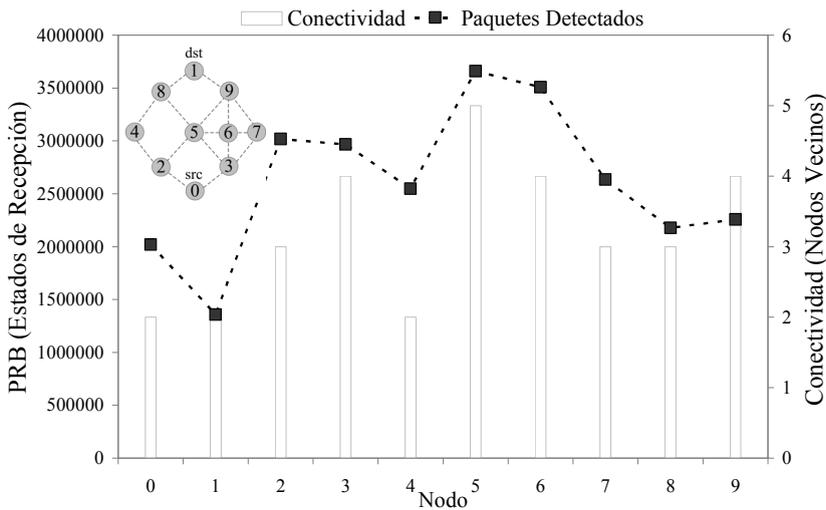


Figura 2.12 Análisis del número de estados de recepción y efecto *overhearing*

Finalmente, a continuación se presenta un análisis del patrón de consumo de energía sobre cada nodo. Para la evaluación, se incrementó el número de réplicas de los flujos de video hasta un valor de 100, con el objetivo de extender el tiempo de análisis sobre la tendencia en el gasto de energía durante 10 horas de operación. Los resultados se presentan en la Figura 2.13. Las gráficas describen tres tipos de evaluaciones. En primer lugar, se realizó un análisis de la demanda de energía sin el intercambio de tráfico en la red, lo que permite obtener el consumo base de la tarjeta inalámbrica correspondiente a la operación en modo *Idle*. Como se aprecia, los resultados describen un valor de consumo aproximado del 35.6% de la capacidad máxima configurada para el estudio (10000 julios). En cuanto a la activación del protocolo de enrutamiento, acorde a los

intervalos recomendados en el estándar RFC 3626 [29] y especificados en la Tabla 2.7, el tráfico generado ocasiona un incremento en el consumo de energía prácticamente imperceptible (aproximadamente 0.4% en cada nodo) que resulta en un consumo total aproximado de 36% sobre cada dispositivo. Tal comportamiento se corresponde con los resultados presentados en la Figura 2.10, acerca de la proporción del tráfico de *routing* frente a los flujos de video.

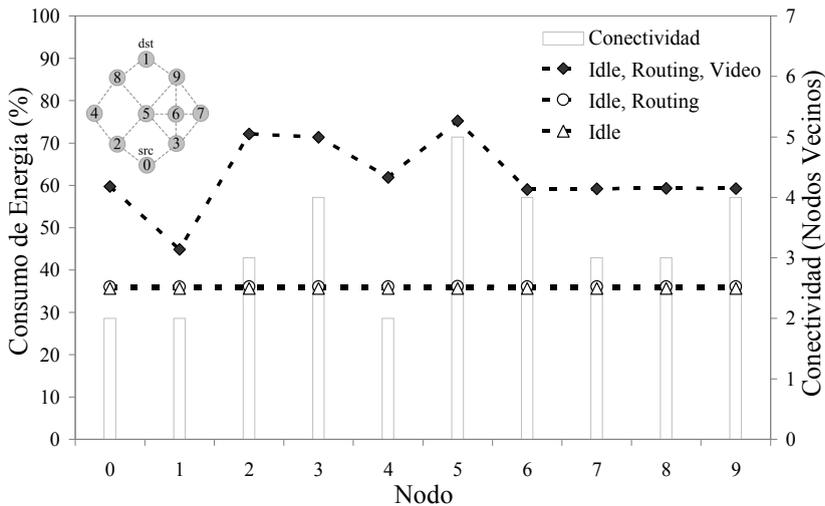


Figura 2.13 Evaluación del patrón de consumo de energía en cada nodo

Con respecto al gasto derivado del tráfico de vídeo, se puede apreciar un incremento notable del consumo de energía. En particular, los resultados describen un comportamiento similar a la tendencia analizada respecto a la frecuencia de operación de un nodo. Específicamente el mayor gasto de energía se genera sobre el nodo 5 con un valor de 75.2%, lo que representa un incremento superior al doble del nivel base de consumo de la tarjeta. El efecto se debe principalmente a la mayor tendencia de participación en el establecimiento de rutas durante el reenvío del tráfico (cuatro de las siete rutas posibles). En cuanto a los nodos 2 y 3, la similitud en cuanto al número de estados de transmisión y recepción resulta en un consumo muy cercano de 72.1% y 71.3%, respectivamente. Un comportamiento similar se obtiene entre los nodos 8 y 9 con un consumo promedio de 59%. Para el caso de los nodos 4, 6 y 7 la tendencia en la conformación de rutas sugiere que el gasto de energía es consecuencia en mayor medida de la detección innecesaria de paquetes que resulta en un incremento significativo de los estados de recepción. Específicamente, el nodo 4 presenta un nivel de consumo aproximado de 60% mientras que los nodos 6 y 7 un valor promedio de 59%, lo que representa un incremento promedio de un 24% respecto al consumo base de la tarjeta.

Los estudios presentados revelan el impacto de la naturaleza compartida del medio inalámbrico, así como del principio de operación de la interfaz de radio sobre el incremento del gasto de energía en un nodo. Dichos factores resultan críticos conforme es mayor la demanda de tráfico, como es el caso de la transmisión de vídeo. En consecuencia, un considerable número de trabajos han dedicado esfuerzos en abordar los desafíos relacionados a la problemática del consumo de energía en redes ad hoc. En el siguiente apartado se presenta una revisión de las principales propuestas descritas en la literatura.

2.3. Clasificación de Soluciones Propuestas en la Literatura

La limitada capacidad de energía constituye el principal desafío operativo para el despliegue de una red ad hoc. No obstante, el diseño de mecanismos de optimización es una tarea de gran complejidad, especialmente como resultado de la gestión distribuida del entorno y la diversidad de capacidades entre dispositivos. Acorde a las dificultades, usualmente se considera como una solución única la gestión de periodos de bajo consumo en las estaciones, lo que implica una desconexión temporal de los nodos. Sin embargo, dada la actual demanda de aplicaciones con requerimientos específicos de calidad de servicio como la transmisión de datos en tiempo real, generalizar dicha solución resulta inviable. En tal sentido, existen diferentes estrategias diseñadas con el objetivo de optimizar el gasto de energía. De acuerdo a la literatura, dichos planteamientos pueden ser clasificados en: Mecanismos de gestión estándar (IEEE 802.11), optimización a nivel MAC, control topológico, control de potencia, protocolos de enrutamiento sensibles al gasto de energía y gestión a nivel de aplicación. A continuación, se presenta un análisis de las estrategias descritas.

El estándar IEEE 802.11 [43] define un esquema denominado *Power Save Mode* (PSM), el cual consiste en un sistema de notificación de tráfico para la planificación de intervalos de operación en modo de bajo consumo (*sleep*). El esquema presenta variantes según la operación de la red en modo estructurado o BSS (*Basic Service Set*) y modo ad hoc también denominado IBSS (*Independent BSS*). Con respecto a una red estructurada, el elemento central o AP (*Acces Point*) es el encargado de coordinar los periodos de menor consumo y almacenar los datos para su posterior envío una vez los dispositivos se encuentre activos.

Tabla 2.8 Condiciones de Operación en el Esquema de Gestión de Energía IEEE 802.11 para Modo IBSS

Condición	Estado Permitido para el Nodo Ad hoc
La estación ha transmitido un mensaje ATIM	Activa
La estación ha recibido un mensaje ATIM	Activa
La estación ha transmitido y recibido un mensaje ATIM	Activa
No ha transmitido ni recibido mensajes ATIM	Bajo consumo (<i>sleep</i>)

En cuanto a la gestión de energía en modo ad hoc, al igual que el caso estructurado, el esquema se basa en notificaciones, con la particularidad que en este caso los mensajes son generados de forma distribuida. Dichas notificaciones, denominadas ATIM (*Announcement Traffic Indication Message*), previenen la operación de una estación en modo ahorro.

En una red tipo IBSS es responsabilidad de un nodo transmisor asegurar que el receptor esté activo. A su vez un nodo receptor debe permanecer disponible durante un periodo fijo de espera (ATIM *window*) en cada intervalo *Beacon*. Dicho procedimiento es realizado con el objetivo de analizar las advertencias de tráfico. En la Tabla 2.8 se resumen las condiciones de operación para una estación ad hoc. En particular, una limitación importante del estándar es el consumo fijo de energía derivado de los periodos de análisis. Adicionalmente, el esquema ha sido diseñado originalmente para operar en un escenario con un único salto, lo que resulta en la pérdida de efectividad para el caso de un entorno *multi-hop*. Específicamente, los nodos tienden a incrementar el *buffer* de datos, ya que únicamente las estaciones a un salto son notificadas sobre la existencia de tráfico en cada intervalo, ocasionando un retardo considerable en los procesos de reenvío. En tal sentido, los mecanismos de optimización a nivel MAC plantean modificaciones en la operación del estándar. En [64] se propone un sistema de ajuste adaptativo para la ventana ATIM en función de la carga de tráfico, lo que permite reducir los intervalos fijos de consumo e incrementar la probabilidad de un nodo para operar en modo *sleep*. En [65] y [66] se presentan estudios adicionales que resaltan la reducción del gasto de energía mediante la modificación de la frecuencia de análisis de notificaciones de tráfico. Por otra parte, en [67] se propone un esquema de adaptación para el caso *multi-hop*. El mecanismo denominado MH-PSM (*Multi-Hop Power Save Mode*) describe una implementación que modifica la estructura de los mensajes ATIM mediante la inclusión de la dirección MAC del nodo final de destino, reduciendo de esta forma el número de intervalos *Beacon* necesarios para la propagación de los datos. En [68] se plantea un mecanismo alternativo que propone tomar ventaja de la característica compartida del medio para inferir el estado de un nodo en función de la señalización detectada (Tabla 2.8), reduciendo de esta forma la latencia en el envío de tráfico.

Por otra parte, la sincronización de los intervalos *Beacon* es un aspecto crítico para la gestión de energía en un escenario *multi-hop*. Para abordar el inconveniente, usualmente se emplean técnicas de control topológico. Tales mecanismos se basan en la conformación de un *backbone* virtual, mediante la selección de nodos coordinadores o supervisores en la red. Dichos elementos son los encargados de las tareas de sincronización, envío de tráfico y gestión de los periodos de menor consumo sobre el subconjunto de estaciones. Por consiguiente, la asignación de la función supervisora es un aspecto clave para este tipo de estrategia. En [69] se describe un mecanismo denominado PSC-MAC (*Passive Self Configuration MAC Protocol*). El esquema designa como supervisores a aquellas estaciones que logren la transmisión de un *frame Beacon* durante los periodos de contención. De forma alternativa, en [70] se plantea un esquema aleatorio de asignación, con el objetivo de garantizar una mayor distribución del rol coordinador. En cuanto a la mayor demanda de energía que implican las tareas

de supervisión, en [71] se describe un mecanismo denominado EE-MAC (*Energy Efficient MAC protocol*), que plantea el análisis del nivel de energía disponible en un nodo como métrica adicional durante el proceso de selección de los dispositivos coordinadores.

Continuando con el análisis, el control de la potencia de transmisión constituye una estrategia adicional para optimizar el consumo de energía. Un nivel inferior de potencia tiene un efecto positivo sobre la capacidad de la red como resultado de la menor contención en el medio, lo que a su vez permitiría un ahorro en el gasto de energía. No obstante, un aspecto a considerar especialmente con fines prácticos de implementación es la marcada dependencia respecto a las condiciones de propagación, así como el potencial incremento en el número de saltos para alcanzar un destino. Para hacer frente a las condiciones del medio, un mecanismo muy empleado es el análisis del parámetro RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), con el objetivo de estimar la distancia con los dispositivos vecinos y adaptar la potencia de transmisión [72], [73]. Un enfoque alternativo se describe en [74], [75], mediante el análisis de la señal recibida con respecto al nivel de interferencia en el medio (SIR, *Signal to Interference Ratio*), lo que permite adicionalmente evaluar el efecto de las transmisiones de nodos vecinos sobre la calidad en los enlaces. En cuanto al número de saltos, el nivel de complejidad sugiere abordar la problemática con la interacción de otras capas en la arquitectura. En [76] y [77] se describen técnicas *cross-layer* que plantean la inclusión de las métricas de potencia respecto a la señal detectada para la toma de decisiones a nivel de enrutamiento. En tal sentido, existen estrategias que proponen la gestión de energía desde la perspectiva de la capa de red, como se detalla a continuación.

La operación de un protocolo de enrutamiento sensible a las restricciones de energía se enfoca en el análisis del gasto ocasionado por el envío de datos desde un nodo fuente al destino. En [78] se discute diferentes algoritmos para la selección de una trayectoria óptima. Específicamente, se resalta el esquema denominado CMMBRC (*Conditional Max-Min Battery Capacity Routing*), el cual define una función de coste basada en la sumatoria de la energía residual sobre los nodos en una ruta. Adicionalmente, el esquema considera un umbral mínimo de capacidad en los dispositivos, con el objetivo de evitar el enmascaramiento de nodos con niveles críticos de energía. De forma alternativa, en [79] se describe un mecanismo denominado *Minimum Drain Rate* (MDR), el cual propone una estimación del tiempo de operación restante en un nodo, como métrica a emplear en la función de coste. Esta información se extrae a partir de la relación entre la capacidad remanente y la tasa de demanda de energía (*Drain Rate*), la misma que a su vez se obtiene a partir de un análisis estadístico [80]. Por otra parte, estudios adicionales plantean el análisis de la calidad de un enlace como estrategia para optimizar el gasto de energía. En particular, en [81] se describe un mecanismo denominado *Reliable Minimum Energy Cost Routing* (RMECR). El estudio deriva un modelo de coste para la transmisión de un paquete considerando el nivel de energía residual así como la probabilidad de éxito en la transmisión, a partir de la métrica ETX (*Expected Transmission Count*) [82]. El planteamiento permitiría un ahorro adicional como resultado de la mayor confiabilidad en las rutas. Un esquema similar se presenta

en [83], con la diferencia de que en este caso la estabilidad del enlace es valorado estadísticamente en términos del tiempo de operación.

Finalmente, con respecto a la optimización del consumo de energía a nivel de la capa de aplicación, las propuestas se centran principalmente en la gestión de la carga de tráfico. Específicamente, en [84] y [85] se describen estudios que proponen aplicar las capas de mejora del sistema de codificación H.264/SVC (*Scalable Video Coding*) [86], para adaptar dinámicamente la calidad de vídeo y por consiguiente el nivel del tráfico, acorde a la energía remanente en los nodos. Adicionalmente, en [87] se presenta un estudio que describe una variación importante del gasto de energía en función de la carga de tráfico.

2.4. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un conjunto de estudios que describen el comportamiento del consumo de energía en una red inalámbrica ad hoc. Las evaluaciones han sido realizadas mediante el desarrollo de experimentos empleando equipos, así como en simulaciones y se han centrado en la operación de la interfaz de radio. Los resultados describen un nivel base de consumo asociado al estado *Idle* así como un incremento apreciable del gasto derivado de la frecuencia de operación en modo transmisión y recepción. En particular, las mediciones revelan una tendencia dominante respecto al consumo de una tarjeta inalámbrica, en especial sobre ordenadores embebidos y dispositivos móviles, con valores que pueden llegar fácilmente a superar al doble de la corriente requerida por una plataforma. En cuanto al consumo asociado a la característica compartida del medio, las evaluaciones realizadas describen la susceptibilidad de la interfaz a operar en los estados de mayor demanda de energía. Dicho comportamiento se relaciona con el principio de funcionamiento de la tarjeta inalámbrica y resulta crítico conforme es mayor la carga de tráfico, así como la densidad de dispositivos en la red. Específicamente, el número de estados de recepción se ve incrementado innecesariamente debido a la cercanía de un nodo con elementos vecinos que intercambian tráfico. Dicho efecto denominado *overhearing* así como el mayor número de intentos de transmisión derivado de la intensa contienda por el acceso al medio son factores decisivos para el rápido agotamiento de los limitados recursos de energía.

En cuanto a las propuestas de optimización, existe un conjunto diverso de trabajos en la literatura, lo que pone de manifiesto la importancia de la gestión de energía para el despliegue de redes ad hoc en condiciones reales de operación. Los estudios abordan la problemática desde diferentes capas de la arquitectura de red. En particular, se resaltan algunas estrategias y conceptos relacionados con el desarrollado realizado en la tesis, como la aplicación de técnicas *cross-layer*, balance de la carga de tráfico, así como el análisis de la energía disponible. A continuación, en el Capítulo 3 del presente trabajo de tesis, se introduce una nueva propuesta direccionada a optimizar el gasto de energía considerando los requerimientos de conectividad del tráfico de vídeo en redes inalámbricas ad hoc.

Capítulo 3

OLSR Estratégico: Un Protocolo de Enrutamiento Cross-layer para Redes Ad Hoc

Como se analizó en los estudios desarrollados en el Capítulo 2, en redes ad hoc el nivel de energía disponible en los nodos es un recurso con serias limitaciones. Los dispositivos con mayor consumo energético constituyen elementos potenciales para la ruptura de enlaces, el incremento en la pérdida de paquetes, así como la desconexión parcial o total de la red. Por consiguiente, la gestión de energía es uno de los mayores desafíos para el despliegue de redes ad hoc. La tarea de los mecanismos de optimización consiste en extender el tiempo de vida de los nodos mediante un equilibrio en el gasto energético. No obstante, alcanzar un balance entre la disponibilidad de la red conservando garantías para la prestación de servicios con niveles de calidad requeridos, es una tarea de gran complejidad. En este capítulo, se presenta un nuevo mecanismo para optimizar el gasto de energía en redes inalámbricas ad hoc considerando los requerimientos de conectividad del tráfico de vídeo. El mecanismo denominado OLSR Estratégico emplea un esquema cross-layer con el objetivo de analizar el nivel de energía disponible en cada nodo para el cómputo de routing. Adicionalmente, las rutas son establecidas considerando el nivel de conectividad de los nodos, lo que permite alcanzar un mejor equilibrio en la distribución del gasto de energía y prevenir la interrupción de los flujos de tráfico. Los resultados describen mejoras en cuanto a la extensión en el tiempo de operación de la red, así como una mayor tasa de recepción de paquetes.

3.1. Introducción

Acorde a la descripción realizada en el Capítulo 1, las redes ad hoc se caracterizan por la capacidad de autoconfiguración y establecimiento de enlaces sin el requerimiento de una estación central coordinadora o infraestructuras preexistentes. En este caso, la gestión de la red se realiza de forma distribuida entre los nodos participantes, especialmente cuando un dispositivo objetivo se encuentra fuera del rango de cobertura del nodo transmisor.

Con respecto a las aplicaciones, más allá de la concepción inicial enfocada en aplicaciones militares o el soporte de comunicación ante eventos de emergencia, en la actualidad representan una opción viable para la implementación de soluciones emergentes, como por ejemplo el concepto de comunicación oportunista, motivado por el crecimiento exponencial de la computación móvil [88]. Adicionalmente, la operación conjunta de redes ad hoc especializadas (VANETs, WSN, WMN, etc), es una opción tecnológica prometedora para el diseño de servicios orientados a *Smart Cities*, así como para la implementación de aplicaciones basadas en el concepto del *Internet of Things* (IoT) [12], [89]. En la Figura 3.1 se resumen los principales aplicaciones para redes ad hoc.

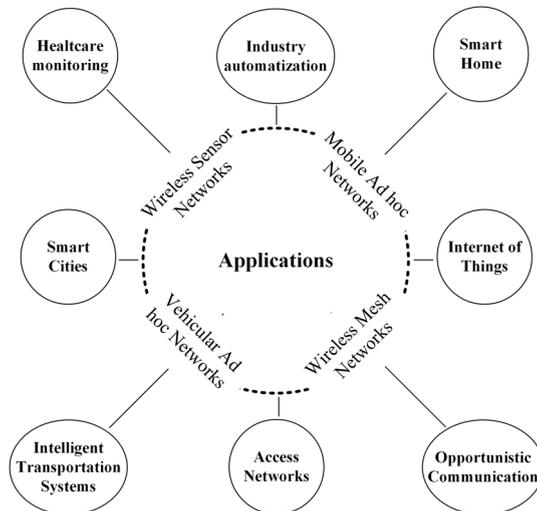


Figura 3.1 Campos de aplicación y escenarios emergentes en redes ad hoc

No obstante, uno de los principales desafíos a enfrentar para la implementación de redes ad hoc es la limitada capacidad de energía disponible en los nodos como consecuencia del uso de baterías. La necesidad de alcanzar mejoras en cuanto al tiempo de operación conservando la autonomía es visible, por ejemplo, a través de planteamientos que aplican técnicas de *harvesting* como un mecanismo de respaldo para extender la operatividad de los dispositivos a partir de diferentes fuentes de energía (solar, eólica,

térmica, etc.), [90], [91]. Sin embargo, dada las limitaciones tecnológicas para mantener una provisión constante de energía en diferentes escenarios, el diseño de mecanismos de optimización resulta primordial con fines prácticos de aplicación. En cuanto a los factores que contribuyen al incremento en la demanda de energía, un aspecto a considerar es la popularidad en la difusión de contenidos multimedia, así como las mejoras obtenidas a través de estándares inalámbricos recientes (IEEE 802.11n/ac), que resultan en un aumento sustancial del tráfico y por consiguiente en un mayor consumo.

Por otra parte, la característica compartida del medio inalámbrico y el mecanismo de funcionamiento de la interfaz de radio son factores claves para la comprensión del agotamiento de energía en los nodos. Las zonas de interferencia son susceptibles a un incremento innecesario de la operación en modo recepción, así como al mayor número de intentos de envío derivado de la intensa contienda por el acceso al canal. En particular, el gasto generado por el efecto *overhearing* representa un porcentaje considerable de la energía demandada por la interfaz inalámbrica y resulta especialmente crítico conforme es mayor la densidad de nodos en el escenario, tal como se ha mostrado en los estudios presentados en el Capítulo 2. En tal sentido, para obtener mayor equidad en el consumo de los recursos de energía, la planificación del gasto deber ser realizada considerando no sólo la alternancia de las rutas para la distribución de los flujos de tráfico, sino adicionalmente las condiciones de interferencia en los nodos que conforman una ruta.

Siguiendo el enfoque descrito, en este capítulo se propone un nuevo mecanismo con el objetivo de optimizar el consumo de energía en redes inalámbricas ad hoc. La propuesta aplica un esquema *cross-layer* para la distribución del tráfico considerando la capacidad de energía en cada nodo. Adicionalmente, se realiza un análisis de las características de conectividad de los nodos basado en el número de dispositivos presentes dentro del área de interferencia. El esquema apunta a reducir el gasto ocasionado por el efecto *overhearing* en las zonas con mayor densidad de dispositivos, así como extender la autonomía de operación sobre aquellos nodos con mayor número vecinos, que resultan estratégicos para conservar la conectividad en la red. La propuesta permite mejorar la autonomía de operación de la red, así como una mayor tasa de paquetes en recepción como resultado de la prevención en la ruptura de los enlaces por el agotamiento de la energía. El diseño ha sido realizado como una mejora al protocolo OLSR (RFC 3626) [29], el cual consiste en un mecanismo de enrutamiento muy empleado en redes ad hoc.

3.2. Trabajos Relacionados

En este apartado se presenta una clasificación de los estudios enfocados en la problemática del consumo de energía en redes inalámbricas ad hoc basadas en el protocolo de enrutamiento OLSR. En particular, dicho protocolo emplea un diseño proactivo que permite a cada nodo obtener una visión completa de la topología de la red. Esto se logra mediante un esquema optimizado de transmisión de mensajes de control o TC (*Topology Control*). El mecanismo, confía las tareas de difusión en un conjunto de nodos especiales denominados MPRs (*Multi Point Relays*).

La selección de dichos nodos se realiza mediante una heurística que analiza sistemáticamente la disponibilidad para llevar a cabo tal función, métrica denominada *willingness*, la capacidad de alcance hacia los dispositivos ubicados a más de un salto del elemento que lo selecciona como MPR (*reachability*) y finalmente la simetría de los enlaces de comunicación con los nodos vecinos. Además, con respecto al descubrimiento de dispositivos vecinos ubicados a un salto, el protocolo implementa un mecanismo de difusión de mensajes denominados *Hello*. En particular, el intercambio de mensajes *Hello*, permite el análisis de los enlaces entre los nodos, a partir de lo cual se establece el tipo de relación (simétrica, asimétrica), así como el tiempo de validez de una conexión. No obstante, el protocolo estándar no considera las limitaciones de energía en el cómputo de enrutamiento. En tal sentido, en la literatura se proponen un conjunto de modificaciones para abordar esta problemática.

Un primer conjunto de estudios, proponen incluir el análisis de la energía en la heurística para la selección de los nodos MPR. La difusión de mensajes de control (*Topology Control*), es una tarea clave para la construcción de la visión topológica de la red. Sin embargo, esta función implica una carga adicional de tráfico y, por tanto, un mayor consumo. El análisis de la capacidad energética permitiría asignar la función MPR únicamente a aquellos nodos con mayor nivel de energía residual, descartando a dispositivos con valores críticos que representan potenciales puntos de fallo en la conectividad. Este esquema puede ser implementado de forma directa mediante la inclusión de la métrica de energía residual como un factor adicional en la heurística de selección. En [92], se describe una propuesta que aplica dicho enfoque estableciendo un umbral de energía como requisito para que un elemento sea considerado en el conjunto de nodos MPR. Una variación a dicho planteamiento se propone en [93], mediante un análisis indirecto de la capacidad de energía. En concreto, se establece el parámetro *willingness* en función de la energía residual y posteriormente se aplica la heurística definida en el estándar. Sin embargo, el inconveniente de esta estrategia es el incremento en el número de nodos MPR requeridos para mantener la conectividad con los vecinos a más de un salto. Tal efecto, es consecuencia de la restricción ocasionada sobre aquellos dispositivos con un nivel alto de conectividad pero que presentan mayor agotamiento de energía. A su vez, el mayor número de nodos MPR seleccionados, ocasiona un incremento del *flooding* de mensajes TC, lo que limita la optimización del gasto. Un análisis del comportamiento descrito se presenta en [94].

Un mecanismo adicional consiste en el análisis del gasto de energía para el cómputo de *routing*. Acorde a esta operación, las propuestas que emplean dicho enfoque pueden ser denominadas como *Energy Routing-OLSR (EROLSR)*. Usualmente, tales mecanismos se basan en una función de coste asociada a las rutas. La función se deriva a partir de la evaluación del consumo de energía que involucran los procesos de transmisión y recepción. Finalmente, se obtiene una aproximación del gasto acumulado a través de los diferentes enlaces existentes entre el nodo fuente y el destino. En cuanto a la ruta óptima, se selecciona aquella que minimice dicho valor. No obstante, tal esquema no considera el nivel de energía disponible en cada dispositivo y, por tanto, es susceptible a ocultar niveles críticos de energía en nodos intermedios, como se discute en [78].

Adicionalmente, las rutas con menor coste tienden a ser sobre utilizadas, lo que implica un mayor agotamiento energético de los nodos que la conforman. Un planteamiento alternativo se describe en [95]. El estudio propone definir como coste de ruta el valor correspondiente al nodo con menor energía residual. Por tanto, se selecciona como ruta óptima aquella cuyo nodo con menor energía es mayor al de las rutas competidoras. Por otra parte, en [96] y [97] se plantean propuestas conceptualmente similares a la descrita en [95]. Sin embargo, en éste caso se emplea la métrica denominada MDR (*Minimum Drain Rate*) [79], [80]. Tal métrica proporciona una estimación del tiempo de operación disponible en un dispositivo. La selección de la ruta óptima corresponde en este caso a aquella con el valor más alto de tiempo de vida. Un inconveniente de las estrategias descritas es la probabilidad del incremento en el número de saltos, como resultado de una evaluación centrada en un único nodo sobre una ruta. En tal sentido, un esquema alternativo consiste en el análisis de la energía residual en cada nodo con el fin de diversificar la conformación de rutas acorde a la capacidad disponible en los dispositivos, como se resalta en [98]. En particular, dicho esquema ha sido empleado como punto de comparación para evaluar la operación de la propuesta diseñada en el presente capítulo, la misma que se detalla a continuación, en la sección 3.3.

3.3. OLSR Estratégico

El análisis del efecto *overhearing*, así como el equilibrio en la conformación de las rutas, representan aspectos claves para optimizar el consumo de energía en una red ad hoc. En particular, el gasto ocasionado por la sobre detección de paquetes requiere un mejor conocimiento acerca de la distribución de los nodos en un escenario y, en especial, de la cantidad de dispositivos presentes en una zona de interferencia. En tal sentido, el consumo innecesario asociado a la característica compartida del medio puede ser gestionado mediante el establecimiento de trayectorias que permitan minimizar la cantidad de nodos operando en modo recepción a pesar de no ser el objetivo del tráfico.

Por otra parte, la diversificación de rutas considerando únicamente el nivel de energía remanente, no es un mecanismo justo para lograr el equilibrio energético entre los nodos de la red. La ubicación de un dispositivo es un factor a considerar que influye notablemente en el consumo de energía. Los elementos con un gran número de dispositivos vecinos, es decir, con mayor nivel de conectividad, presentan una clara tendencia a ser sobre utilizados, como resultado de la mayor probabilidad para conformar una ruta. Tal efecto deriva en un rápido agotamiento de la capacidad de energía disponible. A su vez, los nodos ubicados dentro del área de interferencia resultan afectados frecuentemente por la detección de señales con niveles de potencia válidos para iniciar el estado de recepción. A partir del análisis, la propuesta en el presente capítulo se enfoca en el diseño de un mecanismo de enrutamiento *cross-layer* que permita optimizar el consumo y prevenir la pérdida de conectividad en la red mediante una evaluación de la capacidad de energía disponible en los nodos, así como la distribución de los dispositivos en el entorno inalámbrico. Con tal finalidad, la propuesta introduce en el cómputo de enrutamiento una métrica denominada *valor*

estratégico (SV). Dicha métrica se obtiene a partir del número de dispositivos vecinos dentro de una zona de interferencia y, por consiguiente, proporciona información acerca del nivel de conectividad de un nodo en la red. El valor estratégico se emplea para el cálculo de las rutas hacia un destino. Específicamente, en este caso se implementa un análisis salto a salto con el objetivo de seleccionar como nodos intermedios aquellos dispositivos que presenten mayor nivel de energía remanente, así como menor valor estratégico.

El mecanismo apunta a la conformación de rutas cuyos elementos presenten una adecuada capacidad de energía y, adicionalmente, permitan reducir el efecto *overhearing* sobre la mayor cantidad de elementos posibles. Por consiguiente, el gasto de energía en zonas con mayor densidad de nodos se reduce, mientras la autonomía de operación de los dispositivos con mayor valor estratégico (es decir, nodos con mayor conectividad, con mayor número de vecinos) es incrementada. El planteamiento se diseña a partir de una mejora al protocolo OLSR. En tal sentido, el mecanismo ha sido denominado *OLSR Estratégico* (SOLSR). El esquema no pretende discriminar a los dispositivos con mayor influencia en la red en términos de conectividad, sino por el contrario disminuir en lo posible las transmisiones excesivas que generan un gasto innecesario de energía sobre un gran número de nodos. En la Figura 3.2 se presenta un ejemplo descriptivo sobre la operación del mecanismo propuesto. Los nodos *src* y *dst*, resaltados en los diagramas representan respectivamente el origen y destino para un flujo de datos. Como se puede apreciar, acorde a las zonas de interferencia delimitadas en la Figura 3.2 (a), no existe un enlace que permita la comunicación directa entre los elementos. Por consiguiente, se ha ubicado un conjunto de nodos intermedios a lo largo del escenario. Cabe destacar, que los dispositivos A, B y C, representan elementos en común dentro del rango de cobertura.

En tal sentido, en cuanto a la ruta más corta para el intercambio del tráfico, en las Figuras 3.2 (b), (c) y (d) se resaltan los nodos intermedios A, B y C respectivamente, que permiten alcanzar al destino a través de un salto, así como las zonas de interferencia respectiva para cada dispositivo. Adicionalmente, sobre los diagramas se ha especificado la métrica de valor estratégico asociada a los nodos candidatos acorde al número de vecinos a su alcance, además de una descripción visual acerca de la capacidad de energía disponible (Energía B > Energía A > Energía C). El nivel de batería graficado en cada elemento ha sido definido de forma intencionada con el objetivo de resaltar la operación de la propuesta. En consecuencia, acorde a la distribución de los dispositivos, el nodo candidato B, el cual presenta el menor valor estratégico y mayor energía remanente, representa la mejor opción para el reenvío de tráfico al dispositivo de destino, como se resalta en la Figura 3.2 (e). Específicamente, se puede apreciar que la selección del nodo B reduce el impacto del efecto *overhearing* (7 nodos en la zona de interferencia) comparado con los nodos competidores A ó C con 10 y 11 nodos en las zonas de interferencia, respectivamente. El mecanismo propuesto ha sido implementado empleando el simulador NS3 [57] mediante una extensión realizada al estándar OLSR. En particular, se modificó la cabecera del mensaje *Hello* mediante la inclusión de información acerca del valor estratégico, así como el nivel de

energía residual, como se describe a continuación en los siguientes apartados 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3.

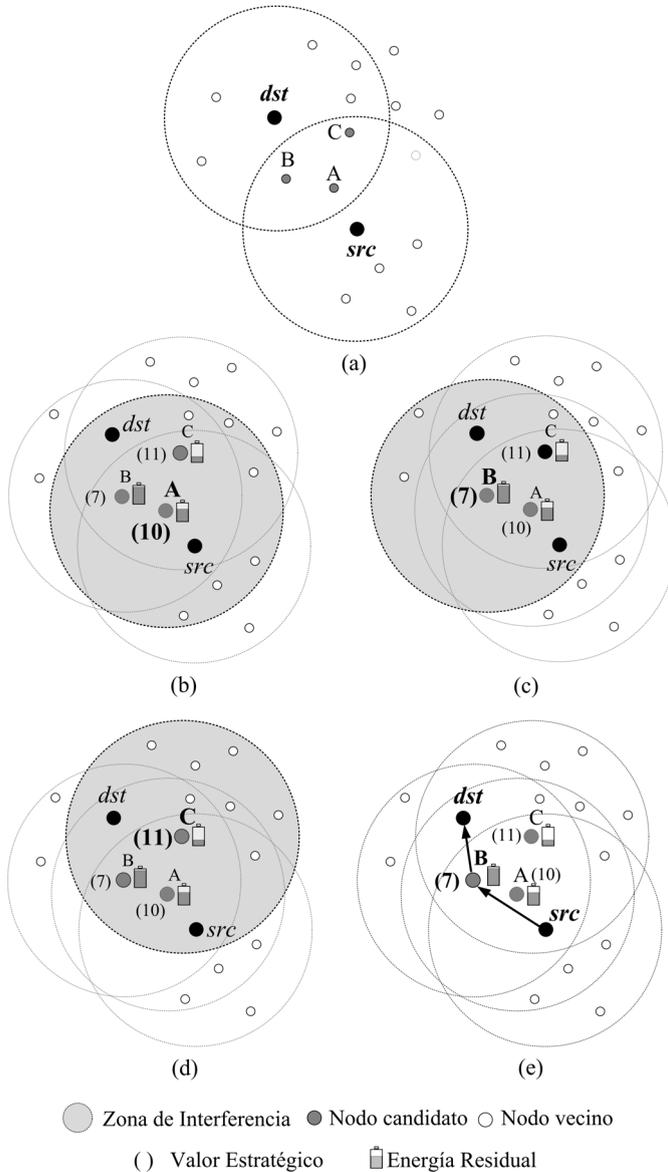


Figura 3.2 Diagrama descriptivo del mecanismo OLSR Estratégico propuesto y rangos de interferencia en los dispositivos: (a) Nodos fuente y destino de tráfico. (b) Nodo intermedio A. (c) Nodo intermedio B. (d) Nodo intermedio C. (e) Establecimiento de la ruta

3.3.1. Valor estratégico

La métrica de valor estratégico se extrae a partir de las tareas *Link Sensing* y *Neighbor Detection* ejecutadas durante el intercambio de mensajes *Hello* del protocolo OLSR estándar.

En la Figura 3.3 se presenta un diagrama esquemático del proceso desarrollado. En particular, la función de *Link Sensing* tiene como objetivo conformar un repositorio (*Link Set*) acerca de los enlaces detectados en las interfaces disponibles en un nodo. A su vez, cada enlace está caracterizado por un conjunto de atributos (*Link Tuples*), donde se especifican las direcciones IP de la interfaz local y la del dispositivo vecino. Además, se incluye información sobre el estado de un enlace (simétrico, asimétrico), así como el tiempo de validez del mismo (*Link Time*). Las características de un enlace se emplean posteriormente en la función denominada *Neighbor Detection*, donde se extrae información asociada a un nodo vecino. Específicamente, esta información contiene la dirección IP, el tipo de relación, ya sea simétrica ó asimétrica, y finalmente, se incluye también el valor *willingness* (entre 0 y 7) definido en el mensaje *Hello* capturado del nodo vecino. Dicho conjunto de atributos denominados *Neighbor Tuples* permiten conformar un repositorio sobre los elementos vecinos ubicados a un salto (*Neighbor Set*).

Con respecto a la propuesta, se implementó una funcionalidad adicional con el objetivo de establecer la cantidad de nodos catalogados como simétricos. Es decir, aquellos dispositivos sobre los cuales se ha verificado el establecimiento de una comunicación bidireccional. La información se extrae a partir de un análisis realizado sobre el repositorio *Neighbor Set* y representa el valor estratégico o nivel de conectividad de un nodo.

Con el objetivo de comunicar el nivel de conectividad a los dispositivos vecinos, así como su empleo posterior en el cómputo de *routing*, se incluyó la métrica de valor estratégico dentro del formato del mensaje *Hello*. Específicamente, se empleó el espacio reservado ubicado en la cabecera del mensaje. Dicho campo tiene originalmente una longitud de 16 bits y se dividió en dos campos de igual longitud para la inclusión tanto del valor estratégico como del nivel de energía remanente. De ésta forma, la modificación efectuada no incrementa el *overhead* durante la operación del protocolo y, adicionalmente, permite una compatibilidad con el esquema estándar. Por otra parte, de forma similar al valor *willingness*, la métrica de valor estratégico se definió como un atributo adicional en el conjunto de características de los dispositivos vecinos (*Neighbor Tuples*) y, por consiguiente, se almacena en el repositorio correspondiente (*Neighbor Set*).

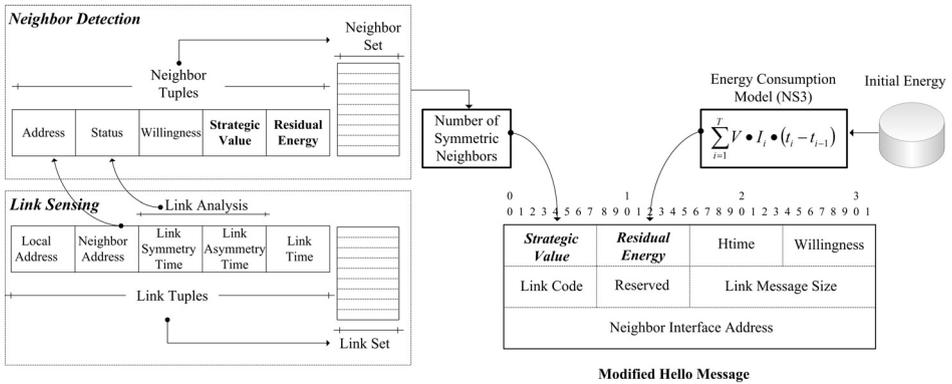


Figura 3.3 Diagrama esquemático: Inclusión de las métricas valor estratégico y energía residual en la cabecera del mensaje Hello

3.3.2. Análisis de energía

La métrica de energía residual se extrae mediante un análisis efectuado a nivel de capa física, como se presenta en la Figura 3.3. En particular, el modelo de consumo disponible en el simulador NS3 [63] (Apartado 2.2.1) permite una monitorización constante del gasto energético ocasionado por los distintos estados de operación en la interfaz de radio. Dicho consumo se analiza frente a la capacidad inicial configurada en un nodo con el fin de obtener el porcentaje correspondiente al nivel de energía residual.

A continuación, este valor porcentual es incluido en el segmento restante del campo reservado sobre el mensaje Hello. La modificación efectuada permite a un nodo el intercambio con los dispositivos vecinos de información sobre la energía disponible y, por consiguiente, habilita el uso de la métrica para el posterior cómputo de enrutamiento. En tal sentido, de forma similar al valor estratégico, el porcentaje de energía residual se incluyó en el conjunto de atributos de los elementos vecinos (*Neighbor Tuples*) y, por lo tanto, se almacena en el repositorio *Neighbor Set*.

3.3.3. Cómputo de enrutamiento

En la Figura 3.4, se presenta un diagrama descriptivo acerca de las diferencias entre el mecanismo de enrutamiento estándar y el esquema propuesto. Acorde al estándar, para la conformación de las rutas, cada nodo debe alcanzar una visión completa de la topología de la red. Dicha información se almacena en un repositorio (*Topology Set*) y se obtiene a partir de la difusión de mensajes TC (*Topology Control*) efectuada por los nodos MPR. Posteriormente, las rutas se establecen considerando el menor número de saltos. No obstante, no se definen prioridades entre los nodos candidatos que permiten alcanzar un destino a través de un mismo número de saltos.

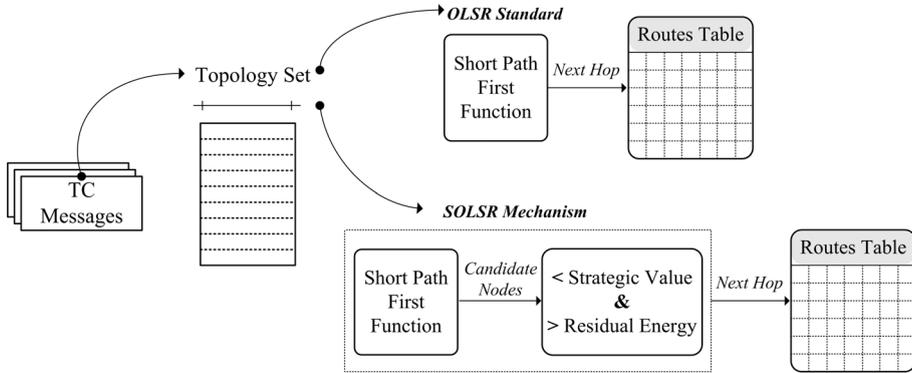


Figura 3.4 Diagrama descriptivo: Computo de *routing* OLSR estándar y esquema propuesto SOLSR

Con respecto al mecanismo propuesto SOLSR, se modificó el cómputo de *routing* mediante la inclusión de las métricas de valor estratégico y energía residual. En este caso, se realiza un análisis entre los nodos candidatos que permiten alcanzar al destino a través de la ruta más corta, seleccionando como próximo salto aquel dispositivo que presente el menor valor estratégico, así como mayor nivel de energía residual. El pseudocódigo para el esquema propuesto se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Cómputo de Enrutamiento en el Mecanismo SOLSR

Required: TargetNode (t_n), Neighbor-Set Nodes (N), StrategicValue (SV), Residual Energy (Er), HopNumber (h), Address (add), EnergyTolerance (α).

Initialize: ($add_{table}, SV_{table}, Er_{table} = \text{null}; h = 2; \alpha = 0.9$)

1: **Begin** RoutingTableComputation

2: **while** ($RoutingFinished = \text{false}$)

3: **for** ($n = 0; n < N; n++$)

4: **if** ($add_n = \text{NextHopTo}add_m \& (add_{table} = \text{null}) \& (SV_n < SV_{table} \& Er_n \geq \alpha * (Er_{table}))$) **then**

5: $add_{table} = add_n$;

6: $SV_{table} = SV_n$;

7: $Er_{table} = Er_n$;

8: **endif**

9: **endfor**

10: **if** $add_{table} = add_{t_n}$ **then**

11: $RoutingFinished = \text{true}$;

12: **else**

13: $h++$;

14: **endif**

15: **endwhile**

16: **end**

Adicionalmente, con el objetivo de asegurar la prioridad en las rutas conformadas a través de los nodos con menor valor estratégico, se estableció una tolerancia (α) que permite un agotamiento adicional de energía en este tipo de nodos. Dicho valor consiste en una diferencia porcentual con respecto a un candidato alternativo. En particular, se definió una diferencia del 10% como un valor de ejemplo para evaluar la operación de la propuesta.

3.4. Evaluación

3.4.1. Metodología

En la Figura 3.5 se presenta un diagrama descriptivo de la metodología empleada para la evaluación de la propuesta. En relación al tráfico, se empleó la secuencia de vídeo descrita en el Capítulo 2 y cuyos parámetros característicos se detallaron previamente en la Tabla 2.5. Con respecto al tratamiento del vídeo, a partir del fichero tipo *yuv* se procede a codificar, empaquetar y generar los descriptores respectivos a la secuencia. El procedimiento se realiza mediante las herramientas FFmpeg [62] y EvalVid [99]. A continuación, los archivos descriptores son empleados en la configuración de los flujos de tráfico sobre la capa de aplicación del simulador (NS3), en conjunto con los parámetros correspondientes a los escenarios diseñados. En particular, se han definido tres escenarios de estudio correspondientes a un entorno de ejemplo, un escenario tipo campus universitario y, finalmente, un entorno con distribuciones aleatorias de nodos.

En cuanto a la evaluación, se realiza un análisis de la propuesta con respecto al mecanismo estándar (OLSR RFC 3626), así como frente a la estrategia de *routing* EROLSR, resaltada en la sección de trabajos relacionados.

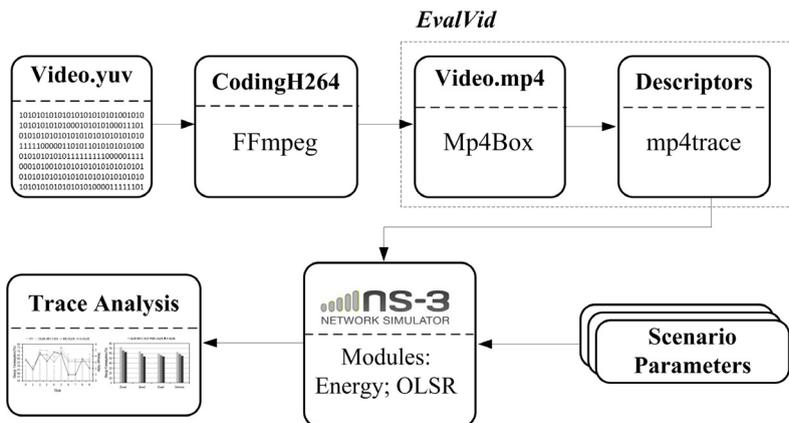


Figura 3.5 Diagrama esquemático de la metodología empleada para la evaluación de la propuesta

3.4.2. Escenario de Ejemplo

En la Figura 3.6, se presenta el primer escenario de análisis correspondiente al entorno *multi-hop* con diferentes niveles de conectividad empleado en el Capítulo 2 (Apartado 2.2.2). En el diagrama se detalla el valor estratégico en cada elemento, así como un conjunto de zonas conformadas por los nodos candidato a primer salto (nodos 2, y 3), segundo salto (nodos 4, 5, 6 y 7) y tercer salto (nodos 8 y 9). Adicionalmente se resaltan las rutas disponibles para el intercambio de tráfico entre los dispositivos origen (nodo 0) y destino de los datos (nodo 1).

Los parámetros de simulación se presentan en la Tabla 3.2. Para la evaluación se ha definido dos casos de análisis. En primera instancia se asigna un nivel superior de energía inicial sobre los nodos fuente y destino del tráfico con respecto a los dispositivos intermedios ubicados en las zonas 1, 2 y 3. Tal condición se ha definido principalmente con el objetivo de evaluar el efecto de la propuesta sobre el tiempo de operación de la red. Posteriormente en el segundo caso, se asigna el mismo nivel de energía sobre todos los nodos, lo que posibilita el envío de todas las iteraciones de vídeo configuradas (100). En este caso la evaluación se enfoca en el análisis del patrón de consumo de energía ocasionado en cada dispositivo.

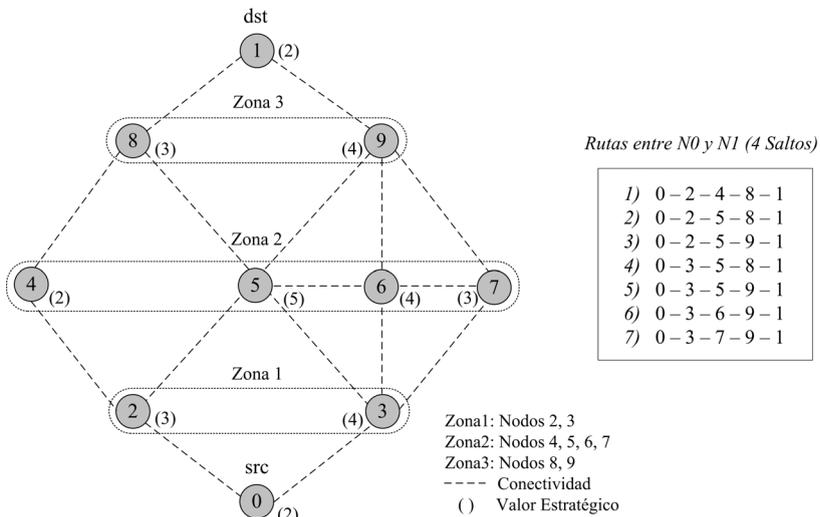


Figura 3.6 Escenario de ejemplo para la evaluación de la propuesta

Tabla 3.2 Parámetros de Simulación para el Escenario de Ejemplo

Parámetro	Descripción/Valor
Consumo Tarjeta Inalámbrica [50]	$I_{Tx} = 606 \text{ mA}$; $I_{Rx} = 485 \text{ mA}$; $I_{Idle} = 30 \text{ mA}$
Tasa de envío	54 Mbps
Sensibilidad	-74 dBm
Potencia de Transmisión	0 dBm
Trafico Video	Duración: 300 segundos <i>Bit rate</i> : 500 kbps (promedio) Iteraciones: 100 Intervalo: 60 segundos
Energía Inicial	Caso 1: 10000 julios (Nodos:0 y 1) 2000 julios (Nodos zonas: 1,2,3) Caso 2: 10000 julios (Toda la Red)

▪ **Caso I**

En la Figura 3.7, se presentan los resultados acerca de la tendencia en la conformación de las rutas para los esquemas de referencia así como para la propuesta. Las gráficas se han obtenido a partir de la captura de los estados de transmisión (métrica *Phy Tx Begin*) en cada nodo durante el envío de los flujos de tráfico. Como se puede apreciar, el comportamiento del protocolo estándar (OLSR RFC 3626) se corresponden con el patrón previamente analizado en el Capítulo 2, el cual describe un dominio en la conformación de las rutas a través del elemento con mayor valor estratégico (nodo 5), así como una frecuencia algo mayor a través de los nodos 2 y 9 como primer y tercer salto (ruta número tres) con respecto a la ruta número cuatro conformada por los candidatos alternativos 3 y 8, respectivamente. En cuanto al mecanismo EROLSR, los resultados indican una mayor alternancia en cuanto a la selección del segundo salto correspondiente a los dispositivos ubicados en la zona 2 (nodos 4, 5, 6 y 7). El efecto es consecuencia del análisis acerca de la capacidad de energía disponible y permite una reducción aproximada del 50% en el dominio del nodo 5. Por consiguiente, la participación adicional es asumida a través de los nodos alternativos. En especial, a través de los dispositivos 4 y 6, los cuales presentan un incremento en el número de estados de transmisión. Con respecto al mecanismo propuesto SOLSR, el patrón de distribución de tráfico presenta una variación significativa. En este caso existe un claro dominio de la ruta número uno conformada por los nodos 2, 4 y 8, correspondiente a los elementos con menor valor estratégico (menor nivel de conectividad) en cada zona. Tal preferencia, es el comportamiento esperado para la propuesta y permite reducir el dominio sobre aquellos nodos cuya operación ocasiona un incremento potencial del efecto *overhearing* en la red. En este caso el número de estados de transmisión del nodo

5 representa tan solo un 11% del total generado por el esquema estándar sobre dicho elemento.

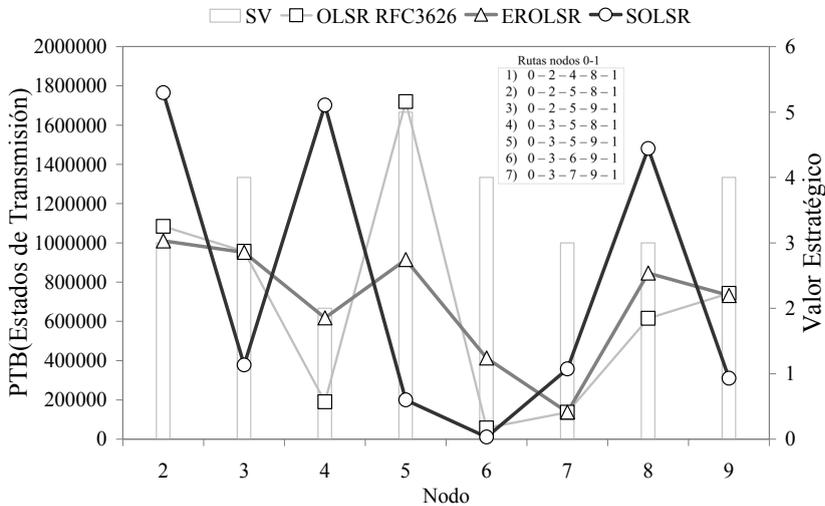


Figura 3.7 Análisis de la distribución del tráfico acorde al número de estados de transmisión en cada nodo

Adicionalmente, en la Figura 3.8 se presenta una evaluación de las pérdidas durante la transmisión de los flujos de datos. Específicamente, la Figura 3.8 (a) describe el número de paquetes perdidos en cada nodo. Las gráficas proporcionan información acerca del nivel de confiabilidad de las rutas seleccionadas. Como se puede apreciar, para el protocolo estándar, el nivel más alto de pérdidas se concentra en el nodo 5, que es el nodo con mayor conectividad en el escenario. Dicho efecto, se ocasiona principalmente por la intensa contienda en el acceso al canal, así como la interferencia entre los flujos de datos durante los procesos de reenvío del tráfico [100]. En tal sentido, la alternabilidad en la selección del segundo salto (nodos 4, 5, 6 y 7) contribuye a reducir las pérdidas, como se aprecia en la gráfica correspondiente al mecanismo EROLSR.

En cuanto al esquema propuesto (SOLSR), la prioridad definida sobre la ruta con menor nivel de congestión (nodos 2, 4, 8) a través de la métrica de valor estratégico permite una reducción adicional de las pérdidas. Dicho comportamiento se ve resaltado en la Figura 3.8 (b), mediante la contabilización del número de paquetes perdidos según el mecanismo utilizado. En particular, los resultados describen una cantidad menor de pérdidas, con un valor que representa aproximadamente una cuarta parte frente al protocolo estándar, así como un nivel cercano a la mitad de paquetes perdidos con respecto al mecanismo EROLSR.

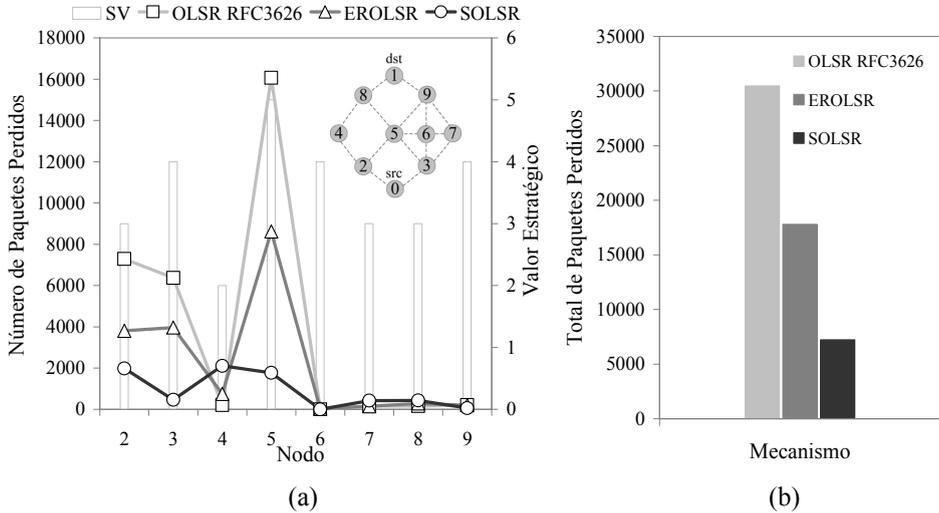


Figura 3.8 Análisis de las pérdidas según la distribución del tráfico. (a) Paquetes perdidos por nodo. (b) Paquetes perdidos por mecanismo

En cuanto a la correspondencia porcentual de las pérdidas sobre el total de datos, en la Figura 3.9, se presentan los resultados de la tasa de recepción de paquetes para las diferentes iteraciones de la secuencia de vídeo. Como se aprecia, en la mayor parte de los casos, la gráfica describe un porcentaje más alto de paquetes recibidos mediante el esquema propuesto. Sin embargo, la diferencia más significativa se aprecia mediante el análisis del tiempo de operación asociado a cada mecanismo antes de la pérdida de conectividad debido al agotamiento de energía en los nodos intermedios, sobre los cuales se definió un nivel menor de energía inicial (Tabla 3.2).

Los resultados describen un tiempo de operación de 159.7 y 176.6 minutos respectivamente para el protocolo estándar y el mecanismo EROLSR. En cuanto a SOLSR se obtiene un valor de 196.6 minutos que representa una extensión adicional en el tiempo de operación de un 19% (36.9 minutos) y 10% (20 minutos), frente a los mecanismos OLSR y EROLSR, respectivamente. La mejora es resultado de la estrategia diseñada para la distribución del tráfico y su efecto en la optimización del gasto de energía, como se muestra a continuación en el estudio correspondiente al caso dos.

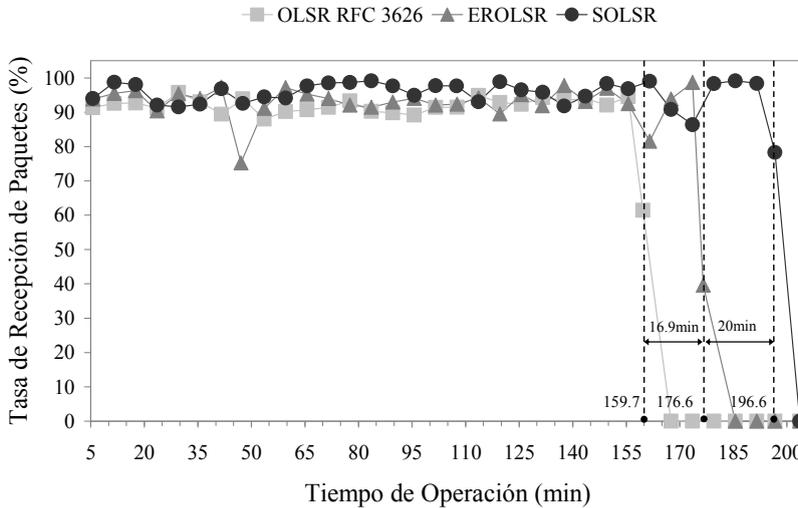


Figura 3.9 Tasa de recepción de paquetes para las iteraciones de la secuencia de vídeo y comparación del tiempo de operación de la red

▪ Caso II

En la Figura 3.10, se presentan los resultados correspondientes al consumo de energía en cada nodo una vez finalizados los flujos de vídeo (100 réplicas). Los niveles obtenidos son un indicador acerca de las rutas empleadas para la transmisión de los datos por cada mecanismo. En el diagrama se incluyó el valor estratégico asociado a cada nodo.

Como se puede apreciar, el protocolo OLSR estándar concentra un mayor consumo de energía sobre el nodo 5, que es el nodo con mayor valor estratégico en la red. En consecuencia, el efecto *overhearing* afecta a un mayor número de elementos. En concreto, afecta a los dispositivos 2, 3, 6, 8 y 9, ubicados dentro del rango de interferencia del nodo 5.

El comportamiento del mecanismo estándar es consecuencia de la ausencia de métricas adicionales al número de saltos para el cómputo de *routing*. Las rutas son definidas únicamente en función de los periodos de actualización de la información de *routing* y, por tanto, los nodos con mayor alcance en la red tienen mayor probabilidad de ser seleccionados. En cuanto a EROLSR, los resultados describen una reducción del consumo sobre los diferentes dispositivos. En particular, el mecanismo realiza un análisis salto a salto de los dispositivos con mayor energía residual y, por tanto, es posible alcanzar mayor alternancia de rutas. No obstante, mantiene un patrón de consumo muy similar al protocolo original. Tal efecto, es ocasionado por la ausencia de un análisis acerca de la distribución de los dispositivos en el medio y, por tanto, el

mecanismo es susceptible a mantener el gasto adicional debido a la sobre detección de paquetes (*overhearing*).

Con respecto a la propuesta realizada en este trabajo de tesis, SOLSR analiza la capacidad de energía disponible, así como el nivel de conectividad a través de la métrica de valor estratégico. De esta forma, el esquema permite asignar prioridad a la ruta con menor efecto *overhearing* (nodos 2, 4 y 8), modificando notablemente el patrón de consumo. El comportamiento se aprecia en el incremento del gasto obtenido sobre los nodos 2 y 4, con menor valor estratégico, frente a los competidores 3 y 5, respectivamente. Por tanto, se alcanza una reducción adicional del consumo sobre el elemento de mayor conectividad (nodo 5). Específicamente, se obtiene un 66% de consumo en dicho nodo, frente al 71% y 75% de los mecanismos EROLSR y el OLSR estándar, respectivamente. Adicionalmente, la prioridad de la ruta con menor nivel de *overhearing* permite reducir de forma considerable el gasto sobre un mayor número de nodos, como se aprecia en los resultados para el caso de los dispositivos 3 (56%), 6 (38%), 7 (38%) y 9 (47%), frente a los niveles de consumo alcanzados con el mecanismo EROLSR de 65% para el nodo 3 y un valor promedio de 56% en los nodos 6, 7 y 9.

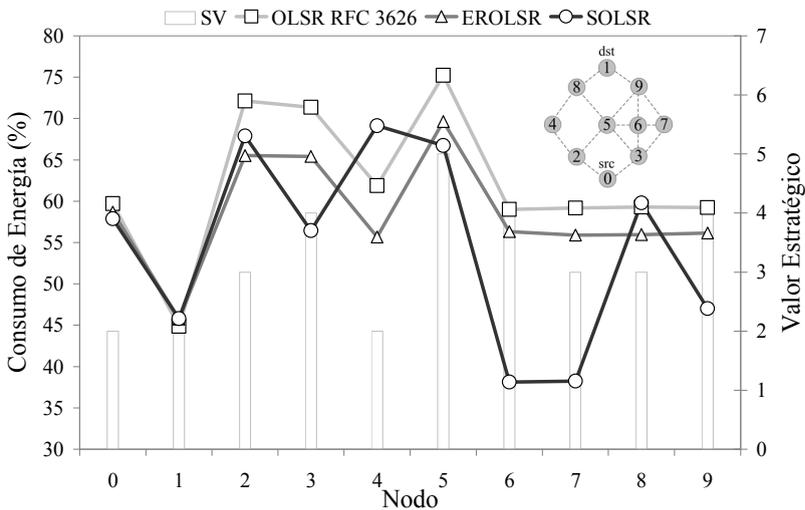


Figura 3.10 Porcentaje de consumo de energía para cada nodo en el escenario

Además, en la Figura 3.11, se presenta una evaluación acerca del consumo de energía promedio en las diferentes zonas del escenario, resaltadas en la Figura 3.6. En particular, SOLSR describe una reducción adicional del gasto en todos los casos. La diferencia más significativa se alcanza en la zona 2 (nodos 4, 5, 6 y 7) caracterizada por la mayor densidad de nodos. En concreto, se obtiene un 53% de consumo frente al 59% (EROLSR) y 64% (OLSR estándar). En cuanto al consumo promedio a nivel de red (incluidos los nodos fuente y destino), la tendencia de optimización se mantiene con valores de 54% (SOLSR), 58% (EROLSR) y 62% (OLSR estándar).

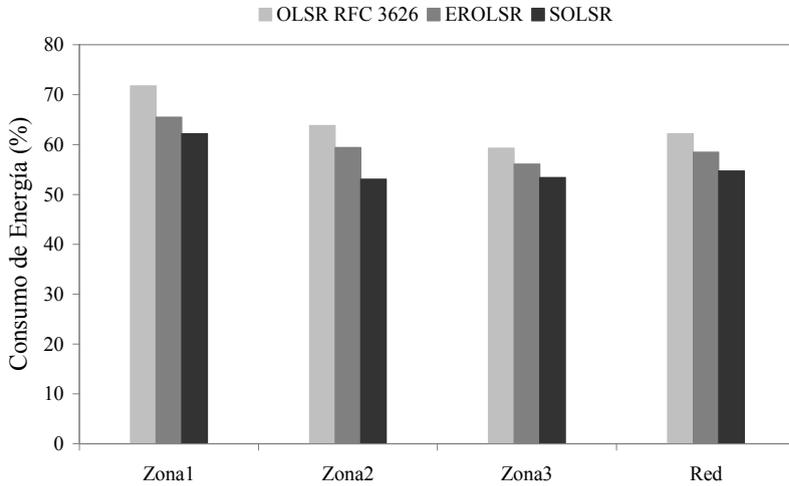


Figura 3.11 Consumo promedio de energía para las zonas definidas en el escenario y a nivel de red

Por otra parte, en la Figura 3.12 se presenta una evaluación con respecto a la calidad de los flujos de tráfico. La gráfica describe el valor promedio del PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) para cada una de las réplicas del vídeo. Como se puede apreciar, los resultados describen un nivel mayor de PSNR mediante el mecanismo propuesto (SOLSR), con un valor promedio de 2 dB y 4 dB superior a EROLSR y el protocolo estándar, respectivamente. Dicho comportamiento se corresponde con los resultados analizados previamente (Figura 3.8), respecto al menor porcentaje de pérdidas de paquetes alcanzado mediante el establecimiento de rutas con menor nivel de congestión.

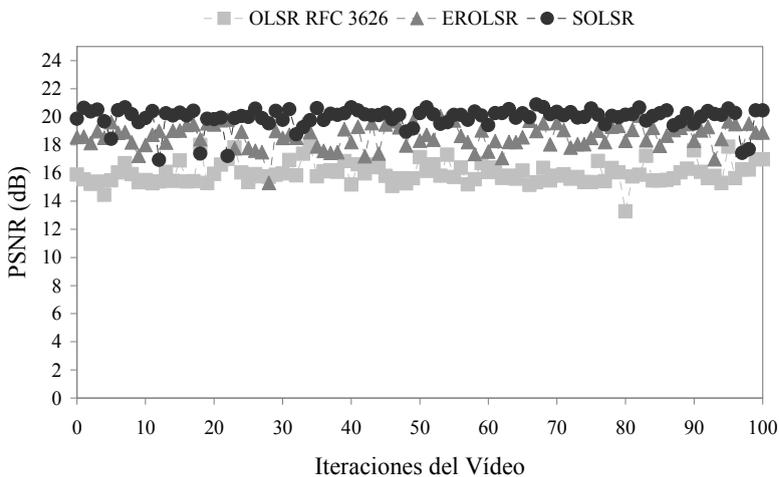


Figura 3.12 Comparación del PSNR promedio para las iteraciones del vídeo

3.4.3. Escenario Campus

En este apartado, se presenta el segundo escenario de análisis que simula el despliegue de una red ad hoc en un campus universitario. Específicamente, la ubicación de los nodos se definió tomando como referencia una sección del campus de la Universitat Politècnica de València, como se aprecia en la Figura 3.13.

El escenario está conformado por un conjunto de nodos fijos que proporcionan conectividad a través de múltiples saltos. La evaluación se centra sobre las tres rutas disponibles entre los nodos 0 y 1, definidos respectivamente como el origen (*src*) y destino (*dst*) para el tráfico de datos. Adicionalmente, se ha configurado de forma intencionada grupos de nodos con diferentes niveles de densidad y ubicaciones aleatorias dentro de zonas específicas. Dichos elementos, representan conjuntos de clientes que resultan afectados debido al efecto *overhearing* en función de la ruta seleccionada para el envío de datos entre los nodos *src* y *dst*. En la Tabla 3.3 se resumen los principales parámetros para la simulación. En cuanto a las características de la interfaz de red, los valores corresponden a los parámetros empleados en el escenario previo (Tabla 3.2).

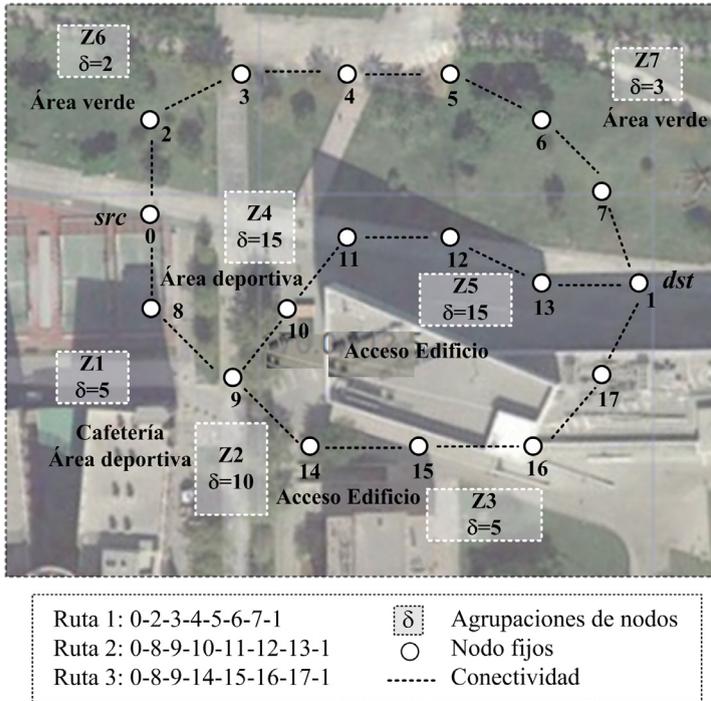


Figura 3.13 Escenario de evaluación tipo campus

Tabla 3.3 Parámetros de Simulación para el Escenario Campus

Parámetro	Descripción/Valor
Trafico Video	Duración: 300 segundos <i>Bit rate</i> : 500 kbps (promedio) Iteraciones: 1
Número de Simulaciones	40
Energía Inicial	Caso 1: 100 julios (Toda la red) Caso 2: 100 julios (Nodos: <i>src</i> y <i>dst</i>) 60 julios (Nodos fijos: 2 al 17) 50 julios (Nodos: zonas: 1 a la 7)
Modelo de Movilidad (NS3)	Nodos fijos: <i>List Position</i> Nodos zonas 1 a la 7: <i>Random Rectangle Position</i>

En la Figura 3.14, se presenta los resultados del estudio. El análisis estadístico se realizó para un nivel de confianza del 95%. Las Figuras 3.14 (a) y (b) corresponden al caso uno (especificado en la Tabla 3.3), con un nivel de energía único (100 *julios*) para todos los dispositivos en el escenario. La Figura 3.14 (a) describe el consumo de energía promedio obtenido sobre los dispositivos que conforman las rutas disponibles entre los nodos origen y destino del tráfico (Figura 3.13). Los resultados son un indicador de la preferencia efectuada por cada mecanismo. En cuanto al protocolo estándar, la ruta dos caracterizada por las agrupaciones con mayor densidad de nodos (zonas 2, 4 y 5) presenta el mayor consumo de energía (68%), lo que sugiere el predominio de dicha ruta para el envío de datos. Con respecto al mecanismo EROLSR, la menor diferencia de consumo especialmente entre las rutas dos y tres (61% y 59%), describe la alternabilidad en la selección. Por otra parte, el esquema propuesto (SOLSR) presenta un claro dominio de la ruta uno (67%) sobre las opciones dos (50%) y tres (45%). Tal preferencia, es el comportamiento esperado como resultado de la menor concentración de nodos a lo largo de dicha ruta (zonas 6 y 7). Adicionalmente, en la Figura 3.14 (b) se presenta el impacto de las rutas seleccionadas sobre el gasto de energía para los nodos clientes ubicados en las diferentes zonas. Como se puede apreciar, existe una correspondencia entre el nivel de consumo en una zona, con el predominio en la selección de una ruta. Específicamente, el mecanismo estándar ocasiona un mayor consumo sobre las zonas 4 y 5 relacionadas con la ruta número dos con niveles de 68% y 62% frente al consumo de 65% y 56% alcanzado con EROLSR, mientras que SOLSR genera el menor impacto sobre dichas zonas con niveles de consumo de 58% y 48%, respectivamente. La operación de la propuesta se aprecia adicionalmente a través del incremento en el consumo de energía sobre las zonas 6 y 7 con menor densidad de nodos, aproximadamente un promedio de 9% mayor frente al consumo ocasionado por los esquemas referenciales.

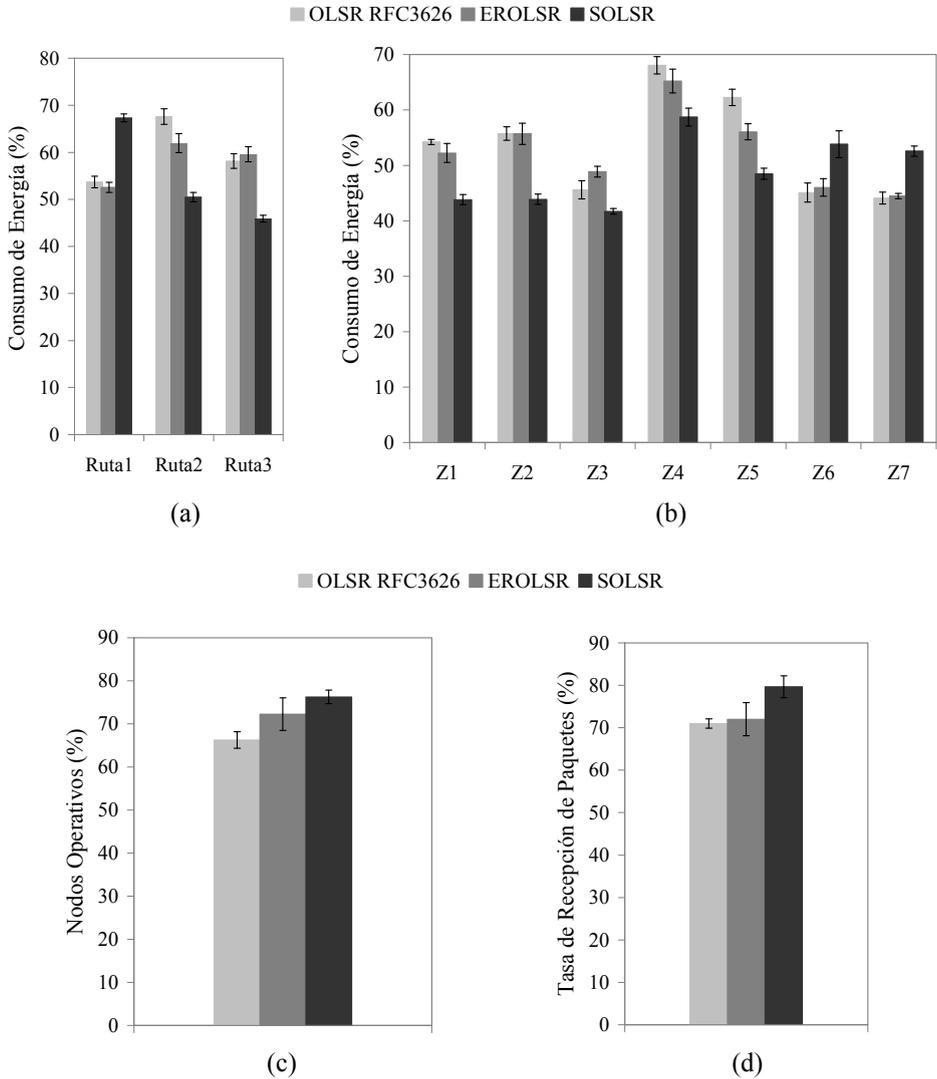


Figura 3.14 Resultados de la evaluación en el escenario campus. (a) Consumo de energía en las rutas. (b) Consumo de energía sobre las zonas 1 a 7. (c) Porcentaje de nodos operativos en la red y (d) Tasa de recepción de paquetes

Por otra parte, en las Figuras 3.14 (c) y (d) se presentan los resultados del caso dos, correspondiente a la asignación de un nivel inferior de energía inicial sobre los nodos fijos (60 julios) que conforman las rutas, así como sobre las agrupaciones en las zonas 1 a la 7 (50 julios), mientras se conserva la máxima capacidad sobre los nodos fuente (*src*) y destino (*dst*) del tráfico (100 julios). Dichas condiciones se han definido con el objetivo de evaluar el efecto de los mecanismos de *routing* sobre la conectividad de la

red. En concreto, la Figura 3.14 (c) describe el porcentaje de nodos operativos alcanzados con cada mecanismo al final del intervalo correspondiente a la duración de la secuencia de vídeo (300 segundos).

Como se puede apreciar, el uso del protocolo estándar provoca que haya menos nodos disponibles en la red (66%) al final de la simulación. El efecto es consecuencia de la tendencia de predominio en la selección de la ruta 2, ocasionando que un mayor número de nodos (zonas 2, 4 y 5) resulten afectados por la sobre detección de paquetes durante el reenvío de los datos. Un incremento en el porcentaje de nodos operativos se obtiene mediante el mecanismo EROLSR con un valor promedio del 72%. En este caso, la alternancia de las rutas permite una mayor distribución del gasto de energía ocasionado sobre las agrupaciones de nodos. Con respecto al esquema propuesto SOLSR, se alcanza el mayor porcentaje de nodos operativos (76%). La mejora se obtiene gracias a la prioridad asignada sobre la ruta número uno, con la menor concentración de dispositivos. En particular, la selección de las rutas tiene un efecto notable sobre la conectividad en la red y, en consecuencia, sobre el número de paquetes que pueden ser transmitidos de forma exitosa. Dicho comportamiento se ve destacado en los resultados de la Figura 3.14 (d), correspondientes a la tasa de recepción de paquetes. Como se aprecia, la planificación de las rutas mediante la estrategia diseñada describe un efecto positivo sobre la prevención de la pérdida de conectividad, con una tasa de recepción superior (80%) a los resultados obtenidos mediante el mecanismo estándar (71%) y EROLSR (72%).

3.4.4. Escenario Aleatorio

En la Figura 3.15, se presenta el tercer escenario de análisis, conformado por un total de 58 nodos en un área de 150m x 150m. Sobre el escenario, se han definido 15 zonas con diferentes niveles de densidad de dispositivos. Dichos elementos, constituyen nodos intermedios para el reenvío de tráfico y han sido distribuidos aleatoriamente en cada zona. En este caso el tráfico corresponde a 60 segundos de la secuencia de vídeo empleada en los escenarios previos. El vídeo se envía de forma simultánea entre los pares de nodos de N0 a N1 y desde N2 a N3. En cuanto al nivel de energía inicial se definió un valor de 40 *julios* sobre los nodos transmisores y receptores del tráfico, así como un nivel inferior (16 *julios*) en los nodos intermedios distribuidos en las zonas 1 a la 15, lo que ocasiona un alto nivel de pérdidas, debido al rápido agotamiento de energía. Consecuentemente en este caso, la evaluación se enfoca en verificar la operación de la propuesta bajo condiciones variables y, en particular, en lo que concierne a la distribución del tráfico, así como el impacto sobre la zona de mayor densidad de nodos resaltada en el gráfico (zona 8). Para el análisis del tráfico se ha incluido un nodo monitor en el punto central de cada zona. Dichos nodos no participan en el reenvío de los datos (*willingness* = 0). No obstante, permiten estimar el nivel de tráfico en cada zona. Los parámetros empleados en la simulación se resumen en la Tabla 3.4. En cuanto a los valores característicos de la interfaz, éstos se corresponden con los especificados en la Tabla 3.2. En la Figura 3.16 se presentan los resultados del estudio. El análisis estadístico se realizó para un nivel de confianza del 95%.

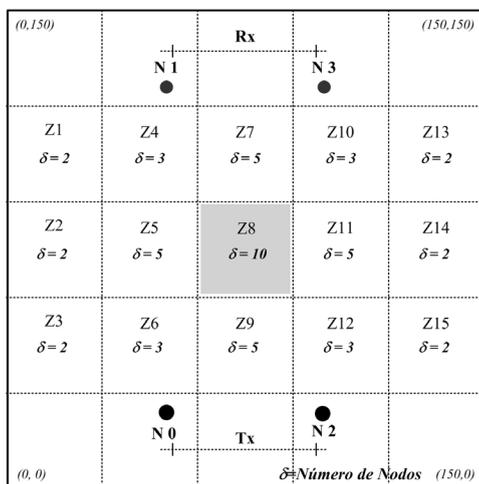


Figura 3.15 Escenario Aleatorio

Tabla 3.4 Parámetros de Simulación para el Escenario Aleatorio

Parámetro	Descripción/Valor
Tráfico Vídeo	Duración: 60 segundos Bit rate: 500 kbps (promedio)
Interacciones	1
Número de Simulaciones	50
Energía Inicial	40 julios (Nodos: N0 a N3) 16 julios (Nodos zonas: 1a la 15)

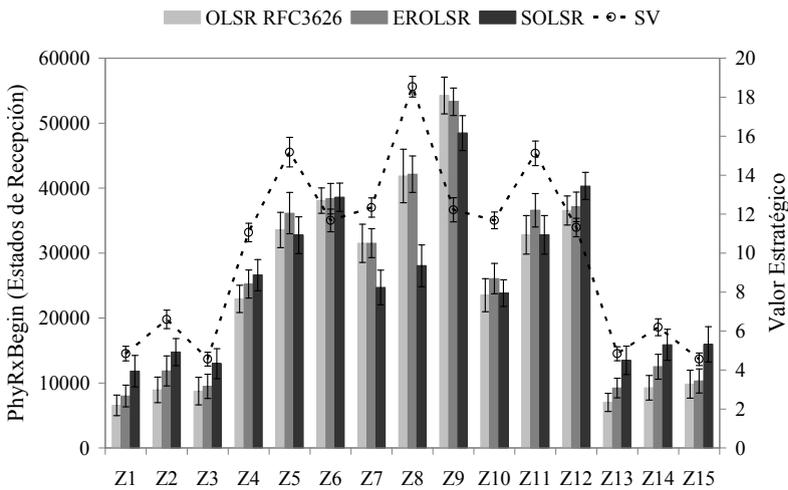
La Figura 3.16 (a), describe el número de estados de recepción sobre los nodos monitores en cada zona como un indicador acerca de la distribución del tráfico en la red. Adicionalmente, sobre la gráfica se ha incluido el nivel de conectividad (valor estratégico) desde la perspectiva de cada nodo monitor. El comportamiento variable del valor estratégico descrito por los intervalos de confianza es resultado de la ubicación aleatoria de los nodos intermedios sobre las distintas zonas en cada simulación, lo que ocasiona de igual forma la variabilidad en el número de estados de recepción. El análisis puede ser abordado a partir de las zonas centrales 7, 8 y 9. Como se puede apreciar, para el caso del esquema propuesto (SOLSR), el número de estados de recepción es claramente inferior sobre dichas zonas frente a los esquemas de comparación. En particular, el resultado en la zona 8, con mayor valor estratégico, acorde al nivel obtenido en el nodo monitor ($\overline{SV}=19$), representa una reducción promedio del 33% del número de estados de recepción respecto a los valores obtenidos

mediante el protocolo estándar y EROLSR, lo que sugiere que se ha producido una distribución del tráfico hacia las zonas laterales.

En cuanto al mayor número de estados de recepción detectados sobre la zona 9 (para todos los casos), dicho resultado es consecuencia de la cercanía con los nodos fuente del tráfico (N0 y N1). La operación de la propuesta se constata adicionalmente a través del mayor número de estados de recepción con respecto a los mecanismos de referencia conforme nos alejamos hacia las zonas de menor conectividad, en especial para el caso de las zonas extremas 1, 3, 13 y 15, caracterizadas por un nivel promedio de conectividad de $\overline{SV} = 5$, así como en los resultados sobre las zonas 2 y 14 ($\overline{SV} = 6$).

Por otra parte, en la Figura 3.16 (b), se presenta el consumo promedio de energía para los nodos intermedios distribuidos en la zona 8, caracterizada por la mayor densidad de dispositivos ($\delta = 10$) y mayor nivel de conectividad ($\overline{SV} = 19$). Como se puede apreciar, a pesar de las condiciones variables del escenario, así como la menor capacidad de energía en los nodos intermedios, la tendencia en la distribución del tráfico hacia las zonas laterales del mecanismo SOLSr permite una reducción promedio de consumo aproximada de 5% con respecto a los esquemas estándar y EROLSR. Cabe resaltar la importancia de la reducción en el gasto de energía sobre la zona 8, debido al mayor nivel de conectividad de los nodos ubicados en dicha zona central del escenario.

Finalmente, en la Figura 3.16 (c) se presentan los resultados acerca del porcentaje de nodos disponibles al término del intervalo correspondiente a la duración del tráfico (60 segundos). Como se aprecia, el mecanismo propuesto permite un mayor porcentaje de nodos operativos 71% frente a un promedio de 64 % obtenido con los mecanismos de comparación.



(a)

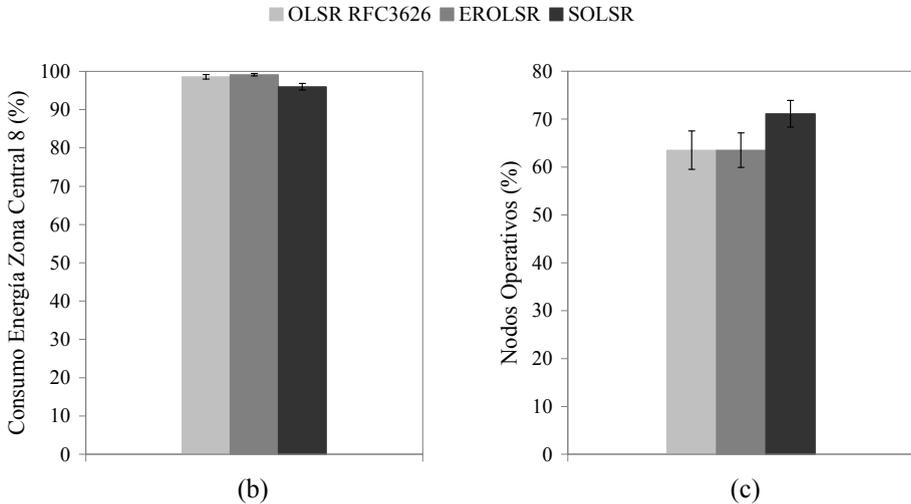


Figura 3.16 Resultados de la evaluación en el escenario aleatorio. (a) Análisis de la distribución del tráfico. (b) Consumo de energía sobre la zona de mayor conectividad (Z8) y (c) Porcentaje de nodos operativos en la red

3.5. Conclusiones

La limitada capacidad de energía disponible en los nodos de una red ad hoc representa uno de los mayores desafíos para el despliegue y diseño de aplicaciones en condiciones reales de operación. En este capítulo, se ha presentado el diseño y evaluación de un mecanismo para optimizar el gasto de energía mediante una reducción del consumo adicional ocasionado por la susceptibilidad al incremento de los estados de recepción (efecto *overhearing*) en zonas comunes de interferencia. La propuesta implementa un esquema de enrutamiento *cross-layer* que permite asignar prioridad en el establecimiento de rutas a través de nodos con un mayor nivel de energía remanente, así como menor nivel de congestión. Dicha operación se obtiene mediante la introducción de una métrica denominada valor estratégico, la cual reporta la importancia de un nodo en la red en términos de conectividad. La propuesta se enfoca en alcanzar un mejor equilibrio en el gasto de energía en el medio inalámbrico acorde a la capacidad disponible en un nodo, así como la distribución de los dispositivos en el entorno, con el objetivo de mejorar las condiciones de conectividad para la transmisión del tráfico de vídeo. Los resultados de los estudios describen una reducción promedio de 5% del gasto de energía en las zonas caracterizadas por la mayor densidad de nodos, lo que permite un incremento en el porcentaje de nodos operativos al final de los flujos de datos, como se aprecia en los resultados de los escenarios campus y aleatorio con una mejora promedio de un 7%.

Adicionalmente, la prioridad generada sobre las rutas con menor nivel de congestión, es decir, a través de nodos con menor valor estratégico, favorece una mayor disponibilidad

y vida útil de la red. Específicamente los resultados presentados en el escenario de ejemplo usando el protocolo propuesto describen un incremento del 10% en el tiempo de operación frente a un mecanismo alternativo, así como un 19% comparado con el protocolo estándar (OLSR RFC3626).

Finalmente, la extensión del tiempo de vida de la red, junto con la estrategia para el establecimiento de las rutas con menor congestión, genera un impacto positivo sobre el flujo de datos, con una mejora promedio de 8% en cuanto a la tasa de recepción de paquetes (escenario campus), así como un nivel mayor de PSNR.

Capítulo 4

Evaluación de SOLSR mediante un Testbed

En la actualidad el paradigma de comunicación ad hoc ha logrado captar la atención del sector industrial. En especial, gracias al planteamiento de áreas específicas de aplicación, así como el desarrollo de conceptos y tecnologías emergentes (IoT, Smart Cities, etc.). En cuanto al ámbito de investigación, tales condiciones han impulsado el estudio de redes ad hoc en escenarios reales de operación. Consecuente con dicho enfoque, en este capítulo se presenta el diseño e implementación de un testbed con el objetivo de evaluar el esquema de optimización de energía propuesto en el Capítulo 3 (SOLSR). En particular, se implementó un conjunto de nodos ad hoc empleando plataformas de desarrollo con Linux embebido, así como una herramienta para la gestión y control de los experimentos. Los resultados de los estudios verifican las mejoras alcanzadas con el mecanismo propuesto. Específicamente, un incremento del tiempo de operación en el nodo de mayor conectividad, así como una mayor tasa de entrega de paquetes, gracias a la prevención de la pérdida de rutas por el agotamiento de energía.

4.1. Introducción

La metodología experimental para el estudio de redes ad hoc se ha caracterizado por el uso de herramientas de simulación. En [101] y [102] se presenta un análisis de los principales simuladores disponibles. Entre los más empleados se encuentran NS2, OMNet++, Opnet y, recientemente, NS3. Los simuladores proporcionan ventajas

significativas en cuanto al tiempo requerido para la configuración de escenarios con diferentes niveles de escalabilidad y, en especial, para la evaluación de propuestas que requieran una densidad considerable de nodos. Adicionalmente, simuladores como por ejemplo NS3, implementan opciones que permiten el trabajo conjunto con equipos terminales con el objetivo de emular con mayor realismo un escenario. No obstante, existen limitaciones debido a las diferencias entre los modelos funcionales (acceso al medio, canal inalámbrico, etc) implementados en las herramientas de simulación y las condiciones altamente variables que caracterizan a un entorno real.

Por otra parte, acorde con la experiencia adquirida en la comunidad científica desde los inicios del paradigma ad hoc, los esfuerzos actuales se orientan principalmente en el diseño de aplicaciones basadas en los escenarios *multi-hop*. Este enfoque ha dado lugar a líneas de investigación con ámbitos específicos de estudio, como por ejemplo las redes tipo *mesh*, las redes vehiculares, las redes de sensores, además de escenarios recientes (*Smart Cities, IoT*), donde las redes ad hoc representan una potencial herramienta para facilitar la conectividad y cooperación entre diversos tipos de agentes, tales como usuarios, sensores y actuadores. En concreto, el control del tráfico, la gestión de la movilidad, la monitorización de condiciones climáticas, la caracterización de entornos urbanos, el despliegue de sistemas de vídeo monitorización, son algunas aplicaciones posibles. Tal enfoque pragmático, ha impulsado la aplicación de nuevas herramientas que permitan una evaluación más realista de una red ad hoc. En particular, mediante el estudio y diseño de experimentos empleando un *testbed*, para complementar las simulaciones y verificar la operación de las propuestas en un escenario real. En [103] se discute las ventajas y desafíos que implica este tipo de metodología frente a las herramientas de simulación. La evaluación experimental empleando dispositivos conlleva esfuerzos considerables en términos de desarrollo, configuración, instalación y control de los experimentos. No obstante, en la actualidad se encuentran disponibles en el mercado una variedad de plataformas de desarrollo (*Arduino, Raspberry Pi, BeagleBoard*, entre otros), con un coste reducido, que permiten el diseño de herramientas de análisis.

En el este capítulo, se presenta el diseño e implementación de un banco de pruebas para redes inalámbricas ad hoc. El *testbed* está conformado por un conjunto de diez nodos configurados sobre plataformas de desarrollo con Linux embebido, en concreto, dispositivos *Raspberry Pi B+* [39]. El control de los experimentos se realiza mediante una interfaz remota de comunicación basada en Node.js [104]. Adicionalmente, sobre cada nodo se implementó un sistema de medición y captura del consumo de energía que demanda la interfaz de radio. El *testbed* tiene como finalidad analizar la operación del esquema de optimización de energía propuesto, para lo cual se implementó el mecanismo SOLSR en cada nodo. Específicamente, se diseñó un conjunto de experimentos para caracterizar el consumo de la tarjeta inalámbrica. Finalmente, se replicó el escenario de ejemplo descrito en el Capítulo 3. Los resultados describen una extensión del tiempo de operación sobre el nodo de mayor conectividad, es decir con mayor número de nodos vecinos, lo que permite prevenir la pérdida de datos durante la transmisión de los flujos del vídeo.

4.2. Trabajos Relacionados

A continuación, se describen algunos trabajos que aplican una evaluación experimental basada en dispositivos. APE (*Ad hoc Protocol Evaluation*) [105], es un estudio que describe un *testbed* para la evaluación de protocolos de enrutamiento bajo condiciones de movilidad. Los nodos se implementan mediante ordenadores y se emplean un total de nueve dispositivos. En [106], se presenta un conjunto de experimentos para evaluar la operación de una variante *multi-path* del protocolo OLSR empleando ordenadores portátiles como nodos ad hoc a lo largo de un escenario conformado por once nodos y un máximo de cuatro saltos en las rutas. En [107], se describe un *testbed* que evalúa la distancia de comunicación entre dispositivos de usuario en redes vehiculares. Entre los resultados del estudio se indica una distancia máxima de 75 metros empleando *smartphones* y el estándar IEEE 802.11g. En [108], se realiza un estudio con el objetivo de caracterizar los enlaces de comunicación en dispositivos IEEE 802.15.4 (*Zigbee*) y adicionalmente sobre nodos IEEE 802.11. Los experimentos son realizados mediante plataformas de desarrollo y ordenadores portátiles. En cuanto a experimentación con un mayor nivel de escalabilidad, en [109] se describe el proyecto Emulab, el cual consiste en un laboratorio remoto conformado por cientos de nodos. Inicialmente, los dispositivos fueron implementados únicamente sobre dispositivos *Zigbee* (plataformas *Mote*), en la actualidad el *testbed* incluye nodos IEEE 802.11 a/b/g. Adicionalmente, en [110], se describe QuRiNET, un proyecto de comunicación que simultáneamente sirve como *testbed* para *Wireless Mesh Networks*. De forma similar, DOME (*Diversity Outdoor Mobile Environmet*) [111], es un proyecto experimental que analiza el efecto de la movilidad en redes ad hoc, mediante la implementación de nodos sobre autobuses para el establecimiento de una red tipo *mesh*.

En relación al análisis de energía, la cantidad de estudios que implementan un *testbed* es muy limitada. En particular, la monitorización del consumo energético implica mayor complejidad en el desarrollo de herramientas de análisis. Entre los estudios disponibles, se resalta el trabajo descrito en [112] centrado en la caracterización del consumo de energía en teléfonos móviles durante la operación de la interfaz IEEE 802.11. En [113], se presenta un estudio del gasto de energía empleando instrumentos de medición sobre la interfaz inalámbrica, lo que permite aislar la demanda derivada de los procesos de comunicación. Finalmente, en [114] se describe un *framework* para monitorear el gasto de energía empleando plataformas de desarrollo. En tal sentido, con respecto a los sistemas de desarrollo, uno de los dispositivos que ha experimentado una gran aceptación es la plataforma *Raspberry Pi* (RPi). En general, la RPi es un ordenador de placa reducida ó SBC (*Single Board Computer*), consistente en un microprocesador y demás componentes integrados sobre una placa única. En la actualidad, es posible encontrar aplicaciones tanto a nivel de proyectos para la implementación de sistemas domóticos [115] como en el ámbito de investigación, por ejemplo para el diseño de redes de sensores [116]. El sistema operativo recomendado para la RPi es la distribución de Linux Raspbian basada en Debian. Por otra parte, existe una variedad de periféricos compatibles con la *Raspberry Pi* a través de sus interfaces disponibles, tal

como la GPIO (*General Purpose Input/Output*) o el bus de comunicación I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Dicha plataforma ha sido empleada para evaluar la estrategia de optimización de energía propuesta en este trabajo de tesis. La arquitectura implementada se presenta a continuación en la sección 4.3.

4.3. Arquitectura del Testbed

En esta sección se detalla la arquitectura del *testbed* desarrollado para evaluar el mecanismo SOLSR. En particular, se describe la implementación de los nodos ad hoc, así como la herramienta para la gestión remota de los experimentos.

4.3.1. Implementación de los nodos ad hoc

El *testbed* consta de un conjunto de diez nodos. En la Figura 4.1, se presenta el diagrama funcional para los nodos ad hoc implementados sobre las plataformas *Raspberry Pi B+* [39].

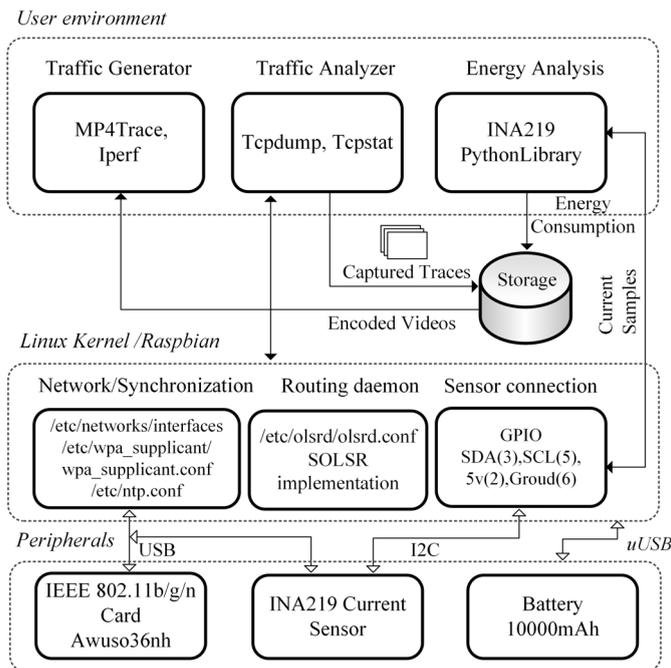


Figura 4.1 Diagrama funcional para los nodos ad hoc implementados

En el bloque *Linux Kernel*, se resaltan los principales componentes para la configuración de los dispositivos. Sobre los archivos *interfaces* y *wpa_supplicant.conf* (bloque *Network/Synchronization*) se definen los parámetros de configuración de red necesarios para la operación de un nodo, tal como la dirección IP, SSID (*Service Set Identifier*), así como la especificación del modo de comunicación ad hoc. En el

Apéndice B.1 se detalla la configuración realizada. Adicionalmente, en cada dispositivo se instaló un cliente NTP (*Network Time Protocol*) con el objetivo de mantener la sincronización en la red para la captura de las trazas durante los experimentos (Apéndice B.2). Para las tareas de enrutamiento, se instaló el protocolo OLSR (*olsrd routing daemon*) [117] y se realizó la modificación del mecanismo de encaminamiento para la implementación del esquema propuesto SOLSR, como se detalla más adelante en la sección 4.4.

Con respecto a los periféricos, la selección de la tarjeta inalámbrica se realizó previa experimentación con varios modelos. Los principales inconvenientes que se presentaron son la compatibilidad de los *drivers* con la plataforma de desarrollo y la operación de las tarjetas en un modo de comunicación ad hoc. A partir de las pruebas se seleccionó la tarjeta Awus036nh (Linux *driver* *rt2800/chipset* RT3070) [40]. En cuanto al suministro de energía, se emplearon baterías de litio (*power bank*) de 10000 mAh. Además, se instaló en cada nodo un sensor de corriente (INA219) [118], con el objetivo de evaluar el nivel de consumo promedio que demanda la tarjeta inalámbrica. El sensor es manejado mediante una librería desarrollada por Adafruit [119].

Por otra parte, a nivel de usuario se han instalado varias herramientas de libre distribución. Específicamente, la herramienta Mp4Trace disponible en el *framework* de Evalvid [99] para la transmisión de tráfico multimedia (vídeo). Las secuencias de video son previamente codificadas (H.264) mediante la herramienta FFmpeg [62] y almacenadas en la tarjeta de memoria (SD *card*) del nodo transmisor. Adicionalmente, se instaló la herramienta Iperf [120], que consiste en un generador de tráfico tipo CBR (*Constant Bit Rate*), así como las herramientas Tcpdump [121] y Tcpstat [122] para la captura y análisis de las trazas de tráfico. En la Figura 4.2, se resaltan los componentes que conforman los nodos ad hoc implementados.

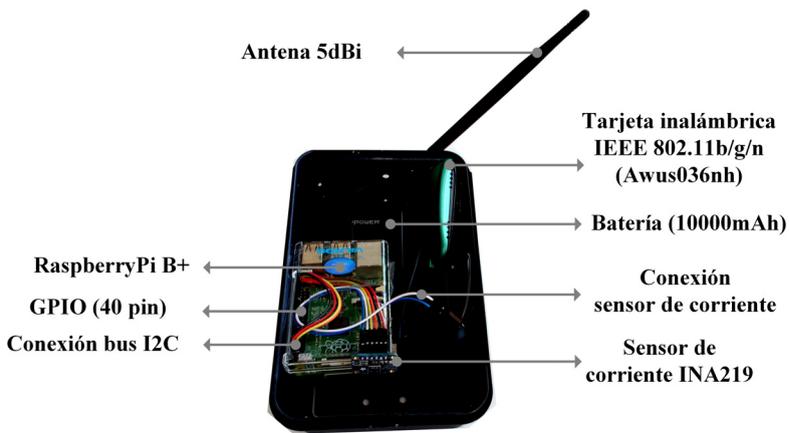


Figura 4.2 Elementos del nodo ad hoc

4.3.2. Gestión remota de los nodos

En la Figura 4.3, se presenta el diagrama de la herramienta desarrollada para la gestión remota de los nodos y control de los experimentos. En tal sentido, se instaló y configuró sobre cada una de las plataformas (RPi) un servidor HTTP basado en Node.js (v0.10.2) [123]. El acceso a un servidor se realiza mediante el navegador (*browser*) a través de la librería *socket.io* [124], que permite el intercambio de información y manejo de eventos en tiempo real. En la interfaz *web* (*front end*), se habilitó un grupo de funcionalidades (a través de botones) con el objetivo de generar peticiones (*client messages*) para la activación de procesos en los servidores. En concreto, estas peticiones son: inicio de un experimento, activación del sensor de corriente, estado del experimento, borrar mediciones previas y, finalmente, apagar un nodo.

Además, se configuró un conjunto de funciones que permiten solicitar información de los procesos en el servidor. Cuando se genera una de estas peticiones desde un cliente, los mensajes se difunden a todos los nodos de la red, lo cual permite la activación simultánea de tareas en todas las plataformas durante un experimento. Los resultados se envían al cliente a través de mensajes (*server messages*) y se presentan en la interfaz *web*, como por ejemplo: mensajes de verificación de sincronización (*Time*), información de enrutamiento (*OlsrInfo*), consumo de energía de la tarjeta inalámbrica, número de paquetes transmitidos y recibidos, potencia de transmisión y variables del sistema (*Temperature*, *CPUload*).

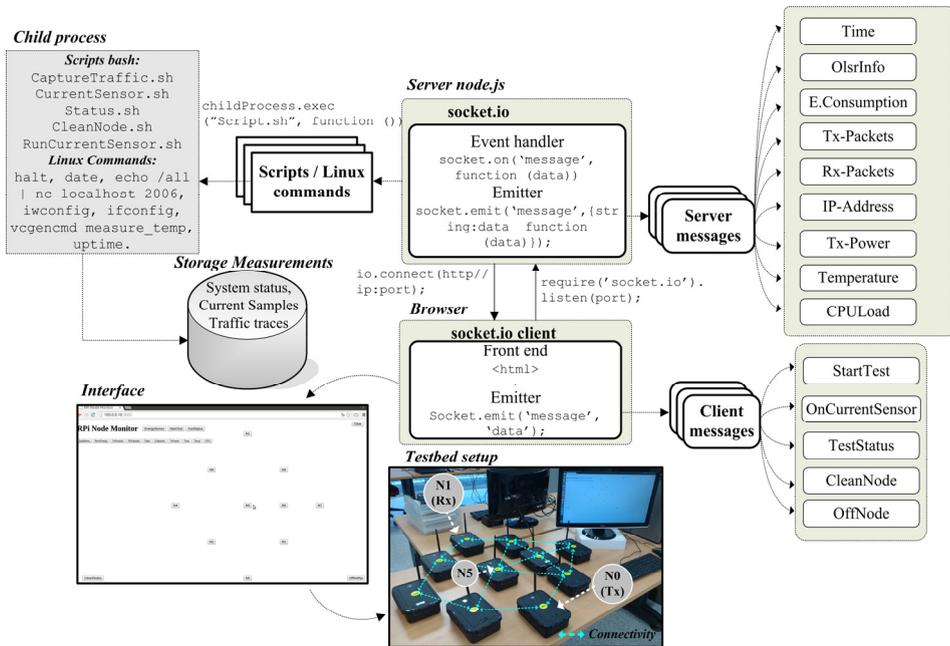


Figura 4.3 Diagrama funcional del testbed implementado

Los mensajes tanto del servidor como del cliente se transmiten mediante la función *socket.emit*. En cuanto a los eventos solicitados, se manejan mediante la función *socket.on* (*'message'*). Específicamente, cada servidor analiza la petición y como resultado activa un proceso (*child process*) que consiste ya sea en un *script bash* previamente configurado o en la ejecución de un comando Linux. Finalmente, cada nodo transmite la información solicitada al cliente.

Adicionalmente, la información distribuida en el bloque *server messages* se genera periódicamente por el servidor, independientemente de alguna solicitud por parte de un cliente. Tal información se almacena en ficheros en las tarjetas de memoria de las plataformas para un análisis posterior. Estos datos consisten en trazas de tráfico, variables del sistema y muestras del consumo de energía capturadas por el sensor de corriente. A continuación, en la sección 4.4, se describe la implementación del mecanismo SOLSR sobre los nodos ad hoc.

4.4. Implementación de SOLSR

En esta sección se detalla el sistema desarrollado para la captura y medición del consumo de energía en las tarjetas inalámbricas de los nodos. Además, se describe el desarrollo realizado para la implementación del mecanismo SOLSR.

4.4.1. Captura del consumo de energía

Acorde a la tecnología de fabricación de baterías existen diferentes métodos para determinar la capacidad de energía. Con respecto a los sistemas basados en electrodos de plomo, las variaciones en el nivel de voltaje, así como el análisis de las propiedades del componente electrolito (densidad, impedancia eléctrica) permiten una estimación de la capacidad disponible. No obstante, tales mecanismos requieren un tiempo de reposo de la batería (sin conexión a un circuito), con la finalidad de obtener mayor fiabilidad durante el proceso de medición. Por consiguiente, resultan poco prácticos para dispositivos recientes que emplean acumuladores de níquel y en especial tecnología de baterías basada en iones y polímeros de litio. Por otra parte, durante el proceso de descarga, las baterías de litio describen un comportamiento prácticamente constante para el voltaje. Las variaciones únicamente se presentan en los puntos extremos del nivel de capacidad, por lo que no es factible inferir con precisión el nivel de energía disponible a partir del voltaje [125]. En tal sentido, actualmente la mayor parte de dispositivos electrónicos implementan un mecanismo que contabiliza el flujo de carga eléctrica (*coulomb counting*) mientras los equipos se encuentran operativos.

El mecanismo consiste en la captura de la demanda de corriente mediante un dispositivo sensor o amperímetro. Las muestras de corriente son evaluadas tomando como referencia un periodo de captura correspondiente a una hora de operación para un dispositivo. Finalmente, la sumatoria de los valores instantáneos de consumo proporciona la demanda de energía, la cual se expresa en miliamperios-hora (mAh), como se describe en (2).

$$E_c(t = T) = \sum_{i=1}^N \frac{m_i(mA)}{M} \quad [mAh] \quad (2)$$

Donde E_c es el consumo de energía en un tiempo de análisis T , m_i es una muestra instantánea de corriente expresada en miliamperios (mA), M es el total de muestras a capturar en una hora de operación y N representa el número de muestras capturadas en un intervalo de análisis deseado (T).

Un mayor número de muestras capturadas proporciona una mejor estimación de la demanda de energía en un dispositivo, usualmente los equipos electrónicos realizan el proceso de muestreo en intervalos de un segundo o incluso milisegundos. Por otra parte, los equipos portátiles de usuario (*laptop*, *smartphone*, etc.) implementan una arquitectura de mayor complejidad. En este caso, el mecanismo que contabiliza el flujo de carga eléctrica, usualmente está incluido en el sistema electrónico de la batería (*Smart Battery*) y la información es proporcionada al equipo (*Smart Host*) mediante un canal de comunicación dispositivo-batería SMBus (*System Management Bus*). Tal sistema de gestión BMS (*Battery Management System*) permite a los equipos mantener el control de los recursos de energía [126], [127].

Con respecto a la propuesta, la operación del mecanismo SOLSR requiere la captura de información acerca del gasto de energía para las tareas de enrutamiento. Con tal finalidad, sobre cada nodo se diseñó e implementó un sistema que emula la arquitectura de gestión de energía descrita (BMS). En la Figura 4.4 se presenta el diagrama funcional para el desarrollo efectuado.

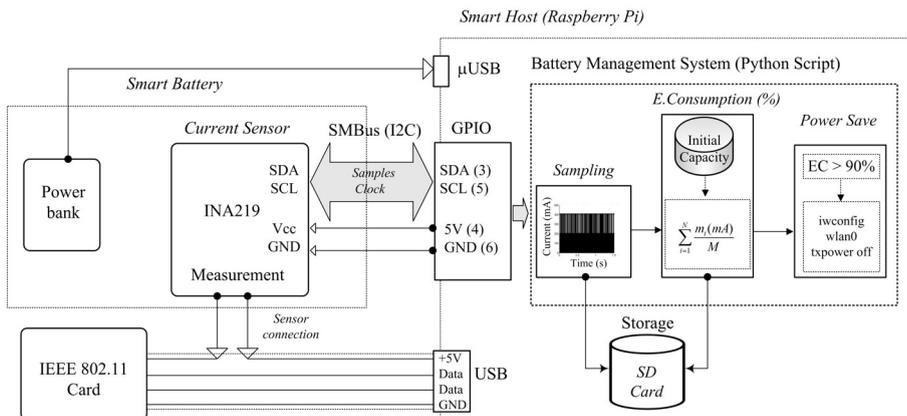


Figura 4.4 Diagrama funcional del sistema de captura y medición del consumo de energía implementado sobre los nodos ad hoc

Como se puede apreciar, el bloque conformado por el *power bank* y el sensor de corriente externo (INA219) [118] emulan los elementos que conforman una *smart*

battery. El sensor cuenta con el estándar de comunicación I2C [128], lo que permite la captura y envío de las muestras de corriente. En cuanto a la plataforma (*Raspberry Pi*), dicha interfaz de comunicación está disponible en el conjunto de terminales de propósito general o GPIO (*General Purpose Input/Output*). De esta forma, es posible establecer un canal de datos (*SMBus*) entre la batería y el nodo ad hoc.

Por otra parte, para efectuar una medición, el sensor dispone de dos terminales adicionales, cuya conexión se realiza de forma similar a un amperímetro, es decir, en serie al elemento donde se evalúa el flujo de carga eléctrica. En los nodos implementados, el análisis de la demanda de corriente se realizó sobre la interfaz de comunicación IEEE 802.11, lo que ha permitido aislar el gasto de energía correspondiente a la operación de la tarjeta inalámbrica durante los experimentos.

Para la gestión del sensor se implementó un *script* en Python empleando una librería previamente desarrollada por Adafruit [119], la misma que permite realizar peticiones al sensor para la captura de las muestras de corriente. En cuanto al proceso de muestreo, se configuró un intervalo de captura de 1 milisegundo entre cada medición. El valor ha sido definido considerando el tiempo mínimo (*ADC Timing*) requerido por el sensor para la captura de una muestra con una resolución de 12 *bits* [129]. A partir del conjunto de muestras capturadas se obtiene la demanda promedio de corriente durante un intervalo de análisis. Dicha evaluación temporal representa el consumo de energía requerido por la interfaz inalámbrica y se calcula en términos porcentuales con respecto a una capacidad inicial de energía definida en el *script* de gestión. El resultado es almacenado en un fichero sobre la tarjeta de memoria del nodo ad hoc y se actualiza en intervalos correspondientes a la frecuencia de envío definida para los mensajes *Hello* del protocolo de *routing*. Finalmente, con el objetivo de emular un estado de ahorro de energía en los nodos, se implementó una condición para la desconexión automática de la interfaz inalámbrica, cuando el consumo supera el 90% de la capacidad inicial configurada. El *script* de gestión se detalla en el Apéndice B.3.

4.4.2. Cómputo de enrutamiento

Para la implementación de la propuesta (SOLSR) se empleó como punto de partida el *daemon* OLSR (*olsrd-0.9.0.2*) desarrollado por *OLSR.org project* [117]. En la Figura 4.5, se presenta un diagrama esquemático para las modificaciones efectuadas. Los ficheros relacionados con las diferentes funciones del mecanismo de *routing* (*daemon*) se resaltan en cada bloque.

Con el objetivo de incluir las nuevas métricas de valor estratégico y consumo energético, se empleó el campo reservado disponible en el formato de cabecera de los mensajes *Hello*. La información acerca del consumo de energía sobre la tarjeta inalámbrica se extrae a partir del sistema de gestión descrito en el apartado previo (Figura 4.4). En cuanto al valor estratégico, la información se obtiene mediante el análisis del número de dispositivos vecinos a un salto y con una relación simétrica en los enlaces. Las modificaciones efectuadas sobre el formato del mensaje *Hello* permiten

el intercambio de información entre los nodos acerca del nivel de conectividad, así como el gasto energético derivado del proceso de comunicación.

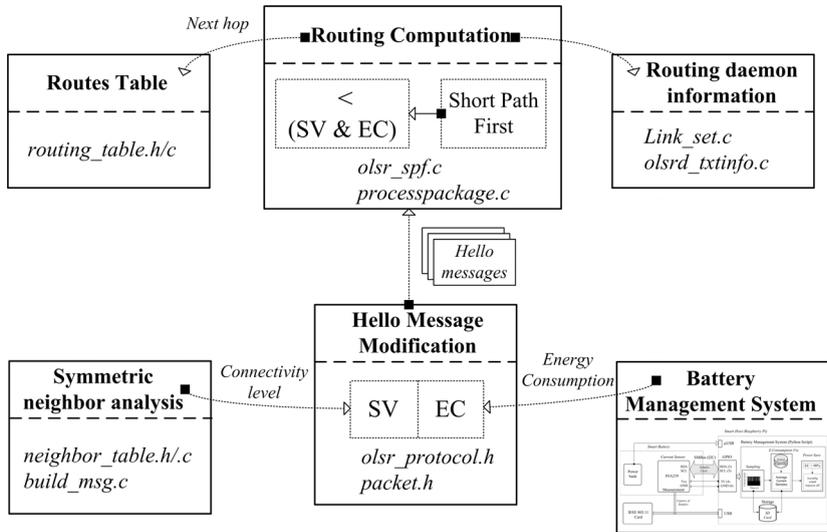


Figura 4.5 Diagrama esquemático para la implementación del protocolo SOLSR

En cuanto al establecimiento de las rutas, a diferencia del mecanismo estándar, en este caso se incluye el análisis de las nuevas métricas durante el cómputo. En particular, a partir de las trayectorias determinadas por el proceso SPF (*Short Path First*), se asigna prioridad entre los nodos candidatos como siguiente salto a aquellos que presenten menor valor estratégico y menor consumo de energía. Cabe aclarar la aplicación de la métrica de consumo de energía en la implementación del *testbed* en lugar del análisis de energía remanente empleada en las simulaciones. La alternativa se ha definido por la factibilidad en obtener las muestras de consumo de corriente en la tarjeta inalámbrica mediante el sensor, comparado con la deducción acerca del nivel de energía residual en la batería. En tal sentido, la capacidad de energía inicial disponible se emula mediante el valor previamente configurado (*initial capacity*) en el sistema de gestión (*script Python*), como se presentó en la Figura 4.4. Finalmente, se actualizó el *plugin olsrd_txtinfo*, el cual permite visualizar información relacionada con la activación del protocolo en un nodo (tabla topológica, tabla de rutas, métricas, etc.). De ésta forma es posible monitorizar de forma remota la operación del mecanismo SOLSR mediante una interfaz de usuario CLI (*Command Line Interface*). El desarrollo efectuado, así como las instrucciones para la instalación y configuración de SOLSR se encuentran disponibles en el sitio *web* del grupo de investigación [130]. A continuación, en la sección 4.5, se describe la evaluación del protocolo.

4.5. Evaluación Experimental de SOLSR

En esta sección, se presenta la evaluación experimental de la propuesta mediante el *testbed*. Para el análisis se configuró el escenario de ejemplo descrito en el Capítulo 3, empleando en este caso el conjunto de nodos ad hoc y se evaluó la operación del mecanismo SOLSR comparado con el protocolo OLSR estándar. A continuación, se detallan los experimentos desarrollados, así como los resultados obtenidos.

4.5.1. Caracterización de la tarjeta IEEE 802.11

En primer lugar, se realizó un estudio con el objetivo de caracterizar el consumo de energía de la tarjeta IEEE 802.11 empleada en los nodos (Awus036NH) [40]. El escenario de análisis consiste en el establecimiento de flujos de tráfico entre dos nodos operando en modo ad hoc. Para la evaluación se empleó un generador de datos CBR (Iperf) [120]. Sobre el nodo transmisor se configuraron flujos de tráfico con una demanda de *throughput* desde 100kbps hasta 54Mbps. En cuanto a los parámetros de operación de la interfaz inalámbrica, se definió una potencia de transmisión de 0dBm y se fijó la tasa de envío en 54Mbps (estándar 802.11g). En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros descriptivos del experimento.

Tabla 4.1 Caracterización de la Tarjeta Inalámbrica de los Nodos Ad hoc

Parámetro	Descripción/Valor
Estándar	IEEE 802.11g
Potencia de Transmisión	0 dBm
Tasa de envío	54 Mbps
Sensibilidad	-76 dBm
Tráfico (Iperf)	Tipo: CBR (paquetes UDP) Número de flujos: 24 <i>Bit rate</i> : desde 100 kbps a 54 Mbps Duración de cada flujo: 10 segundos
Número de nodos	2

En primera instancia, en la Figura 4.6 se presentan los resultados sobre el comportamiento del *throughput* conforme se incrementa la carga de tráfico. El análisis tiene por objetivo determinar el tráfico real medido en el escenario para los diferentes flujos de datos configurados sobre el nodo transmisor.

Como se aprecia, en la gráfica se puede distinguir un primer intervalo con un comportamiento lineal entre el *throughput* resultante y la carga ofrecida. La relación se mantiene hasta una demanda aproximada de 13Mbps. A partir de dicho valor, el incremento en el *throughput* es menor, en este caso los resultados describen la

tendencia hacia un límite máximo de la capacidad efectiva del canal. Como se puede apreciar, para el caso del máximo teórico definido en el estándar (802.11g@54Mbps) se obtuvo un *throughput* promedio de 19.6Mbps. Tal comportamiento es una característica inherente en un escenario ad hoc. En particular, esto es debido al mecanismo de control para el acceso al medio, así como a la señalización (*overhead*) a nivel MAC (mensajes ACK) que limita la velocidad y, por tanto, el flujo efectivo del tráfico [35], [36], [100].

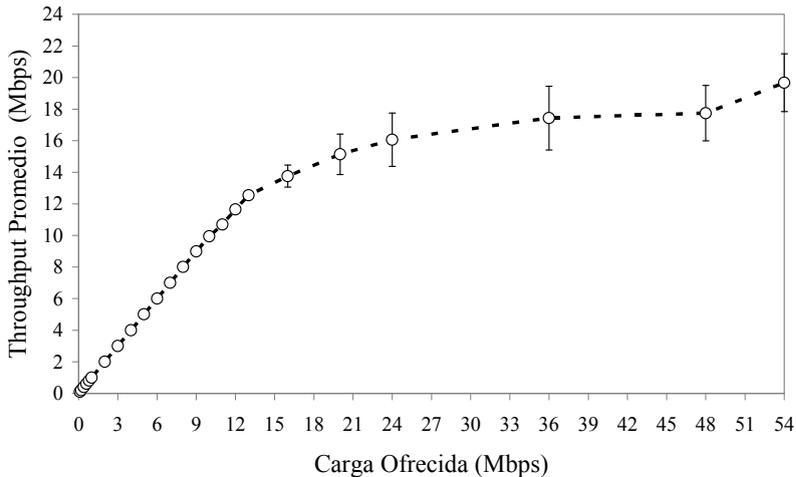


Figura 4.6 *Throughput* resultante vs. Tráfico ofrecido (estándar 802.11g@54Mbps)

Con respecto a la demanda de energía de la tarjeta inalámbrica, en la Figura 4.7 se presentan los resultados del consumo de corriente para los valores de *throughput* determinados previamente. Las muestras de corriente han sido capturadas sobre la interfaz del nodo transmisor, durante el desarrollo del experimento. Como se puede apreciar, la tendencia de la curva se corresponde con la evaluación previa, es decir, conforme se incrementa la carga de tráfico el nivel de corriente requerido para la operación de la tarjeta inalámbrica es mayor. En particular, el menor nivel de consumo se obtiene para el flujo de 100kbps con una demanda promedio de 206mA.

En cuanto a los incrementos en el consumo, los resultados describen un comportamiento aproximadamente lineal hasta un nivel de *throughput* promedio cercano a los 12Mbps. En este caso el consumo de corriente alcanza los 335mA, lo que representa un incremento del 64% en relación al mínimo obtenido (206mA). Con respecto al consumo de corriente para el intervalo superior a 12Mbps, la gráfica presenta una tendencia de mayor estabilidad. Dicho comportamiento es resultado de la menor variación entre los flujos de tráfico hasta alcanzar la máxima capacidad del canal. En consecuencia, el mayor nivel de consumo se obtiene para el límite de 19.6Mbps determinado previamente (Figura 4.6), específicamente, una demanda promedio de 347mA, que representa un incremento del 70% comparado con el consumo mínimo de 206mA obtenido con el flujo de 100kbps.

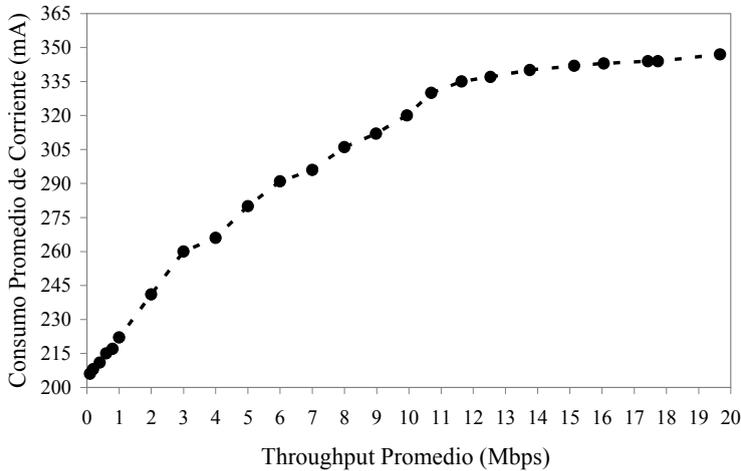


Figura 4.7 Consumo de corriente de la tarjeta inalámbrica vs. *Throughput* promedio

Adicionalmente, en la Figura 4.8, se presentan ejemplos de las muestras de corriente capturadas durante la operación de la interfaz inalámbrica para diferentes flujos de tráfico. Sobre las figuras se resalta el consumo promedio y se han graficado únicamente intervalos de 1.5 segundos con el objetivo de visualizar el comportamiento de las muestras. En particular, a partir de la operación del sensor de corriente se ha detectado niveles de consumo de 204mA y 409mA en la tarjeta inalámbrica. Específicamente, se puede apreciar un incremento notable en el número de las muestras capturadas con un nivel de 409mA, conforme es mayor la carga de tráfico. Acorde a dicho comportamiento se deduce que el nivel de 409mA corresponde a la demanda de corriente de la tarjeta durante el estado de transmisión. Por otra parte, considerando la ausencia de niveles adicionales de consumo detectados por el sensor, el valor de 204mA se atribuye a un consumo base de la interfaz como resultado de los procesos de análisis del medio y la operación en modo recepción.

El nivel de consumo base es dominante cuando la demanda de tráfico es baja comparado con la capacidad efectiva del canal. Dicho comportamiento se aprecia en las Figuras 4.8 (a), 4.8 (b) y 4.8 (c), cuyos valores promedio de consumo no presentan cambios significativos. En cuanto a las Figuras 4.8 (d), 4.8 (e) y 4.8 (f), correspondientes a los flujos de tráfico con un *throughput* promedio de 2, 8 y 17 Mbps, los resultados describen una variación significativa del consumo promedio de corriente con incrementos respectivos de 18% (241mA), 50% (306mA) y 68% (344mA) en relación al nivel base (204mA).

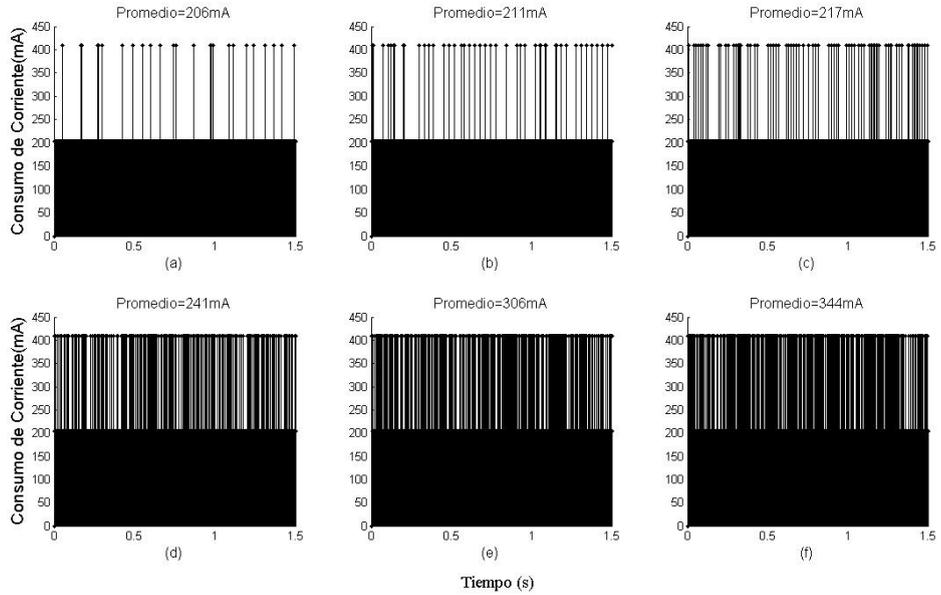


Figura 4.8 Muestras de corriente capturadas durante la operación de la tarjeta inalámbrica para diferentes flujos de tráfico. (a) 100kbps, (b) 400kbps, (c) 800kbps, (d) 2Mbps, (e) 8Mbps y (f) 17Mbps

4.5.2. Evaluación en el escenario de ejemplo

A partir del estudio realizado, las características operativas de la tarjeta inalámbrica han permitido detectar únicamente dos niveles de consumo de corriente. Dicho comportamiento es inherente al *hardware* de la interfaz de radio de los nodos ad hoc implementados. No obstante, la restricción, en este apartado se presenta la evaluación del mecanismo SOLSR sobre el entorno *multi-hop* correspondiente al escenario de ejemplo descrito en el Capítulo 3. El análisis se enfoca en verificar la estrategia diseñada para el establecimiento de las rutas, así como el efecto ocasionado en cuanto al gasto de energía sobre el nodo de mayor conectividad en el escenario.

En la Figura 4.9, se presenta el escenario de ejemplo implementado en el laboratorio mediante el *testbed*. Las características de conectividad resaltadas se han obtenido mediante la configuración de filtros de capa 2 en cada nodo. De esta forma, es posible replicar las condiciones del entorno *multi-hop* evaluado previamente en el simulador (Apartado 3.4.2). Como se aprecia, existen siete rutas alternativas entre el dispositivo origen (nodo 0) y destino de los datos (nodo 1), como tráfico se empleó un intervalo de 60 segundos de la conocida secuencia de vídeo “*Big Buck Bunny*” [59]. Además, sobre la figura se ha resaltado el valor estratégico correspondiente a cada elemento, donde el nodo 5 es el dispositivo de mayor conectividad. En cuanto al nivel de energía, en el *script* de gestión (Figura 4.4) se especificó una capacidad inicial de 4.17mAh en cada

nodo. Dicho nivel de capacidad se definió a partir de experimentos previos para mantener la operatividad de los nodos considerando la duración de la secuencia de vídeo (60s). Los principales parámetros empleados en el *testbed* se detallan en la Tabla 4.2.

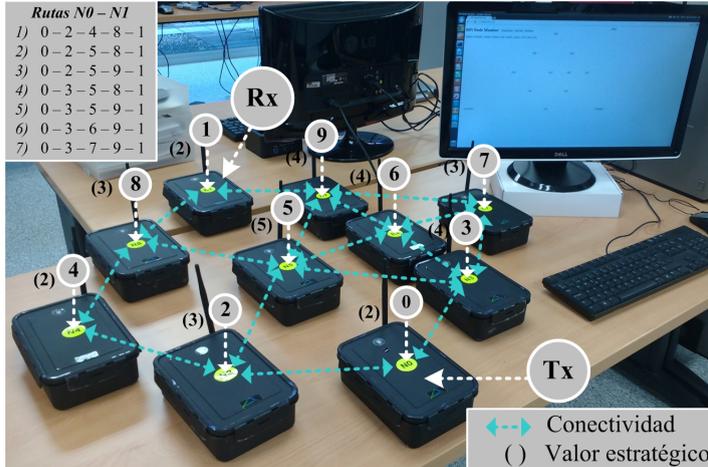


Figura 4.9 Configuración del escenario de ejemplo para la evaluación de la propuesta mediante el *testbed*

Tabla 4.2 Parámetros de Configuración Empleados en el *Testbed*

Parámetro	Descripción/Valor
Estándar	IEEE 802.11g
Potencia de Transmisión	0 dBm
Tasa de envío	54 Mbps
Intervalo mensajes de <i>routing</i>	Hello: 2 segundos; TC: 5 segundos
Tráfico Video	Secuencia: <i>Big Buck Bunny</i> [59] Resolución: CIF (352 x 288) Frames por segundo: 30 Tamaño de GOP: 30 Duración: 60 segundos <i>Bit rate</i> promedio: 300 kbps Codificación: H.264 Número de Iteraciones: 10
Energía Inicial	4.17 mAh

En la Figura 4.10 se presentan los resultados de la demanda de corriente capturada sobre las tarjetas inalámbricas en cada uno de los nodos. Acorde a los análisis previos, un incremento en el consumo con respecto al nivel base de 204mA describe la detección de un mayor número de muestras correspondientes al estado de transmisión (409mA). Por consiguiente, los resultados proporcionan información sobre la tendencia en la conformación de las rutas para la distribución del tráfico. Como se aprecia, en cuanto al protocolo OLSR estándar, los mayores niveles de corriente sobre los nodos 3, 5 y 9 con valores promedio de 217mA, 215mA y 214mA describen el predominio de la ruta número cinco (Figura 4.9), que incluye al dispositivo de mayor conectividad en el escenario (nodo 5). Por otra parte, mediante el mecanismo propuesto SOLSR los niveles más altos de corriente se obtienen sobre los nodos 2 (218mA), 4 (215mA) y 8 (214mA), correspondientes a la ruta alternativa número uno. La trayectoria seleccionada está conformada por los nodos de menor nivel de conectividad (menor valor estratégico), lo que permite verificar la distribución del tráfico acorde a la estrategia diseñada. En este caso, el nivel de intensidad requerido por la tarjeta inalámbrica en el nodo 5 con mayor valor estratégico se reduce en un 5% respecto al protocolo estándar.

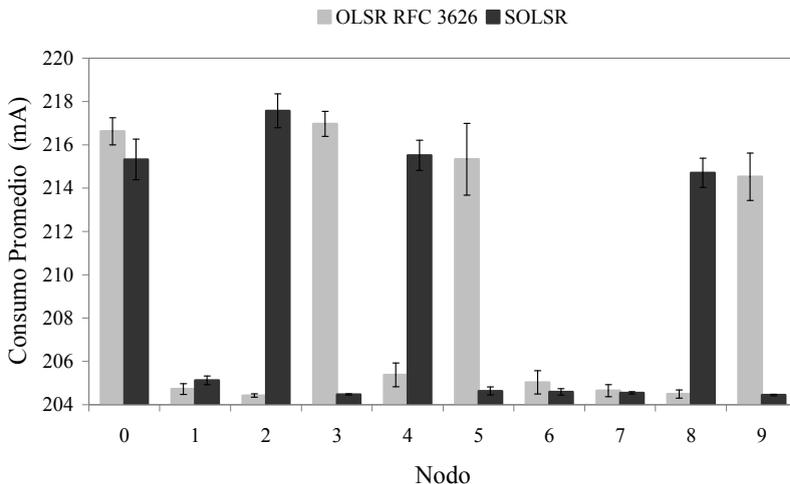


Figura 4.10 Consumo de corriente en cada nodo durante la transmisión del vídeo

A continuación, se realizó un estudio en el cual se configuró de forma intencionada un consumo inicial del 50% de la capacidad de energía sobre el nodo 5. Tal condición se definió con el objetivo de evaluar el caso cuando dicho nodo con mayor conectividad en el escenario agota la energía disponible antes de finalizar el experimento, ocasionando la pérdida de rutas entre los dispositivos fuente (nodo 0) y destino de los datos (nodo 1).

En este caso se empleó la herramienta Tcpdump [121] con el objetivo de capturar y analizar el tráfico que cada nodo intermedio genera hacia el dispositivo de destino (nodo 1) y deducir de esta forma la conformación de las rutas. En la Figura 4.11 se

presentan los resultados del *throughput* medido en cada nodo intermedio. Como se puede apreciar, el protocolo estándar OLSR concentra el tráfico a través de los nodos 3, 5, 6 y 9, de lo que se deduce el predominio de las rutas número cinco y seis (Figura 4.9). En cuanto a SOLSR, el mecanismo define como mejor alternativa, la ruta número uno, conformada por los nodos 2, 4 y 8. Tal operación, es el comportamiento esperado para la propuesta, debido al menor nivel de conectividad de los nodos seleccionados. En consecuencia, en este caso el flujo de tráfico evita al nodo 5, el cual es el dispositivo con la mayor restricción de energía acorde a la configuración realizada en el experimento.

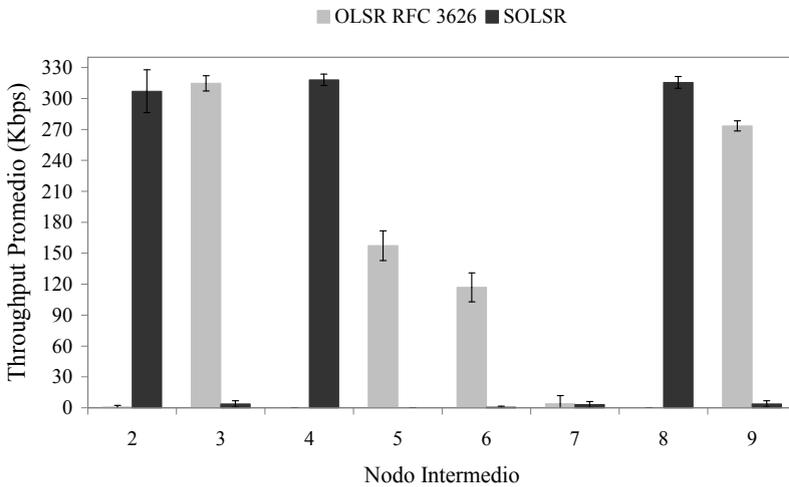


Figura 4.11 *Throughput* promedio capturado sobre los nodos intermedios

Adicionalmente, con el objetivo de evaluar el efecto de las rutas definidas por cada mecanismo, en la Figura 4.12 se presentan resultados del *throughput* capturado en el dispositivo de destino (nodo 1) para una de las iteraciones del vídeo.

Como se puede apreciar, la operación del protocolo estándar genera la interrupción del tráfico en el intervalo aproximado entre los 28s y 35s. Tal efecto es ocasionado por la pérdida de conectividad debido al agotamiento de energía en el nodo 5. Posteriormente, la ruta al elemento de destino se recupera a través del nodo 6, como se infiere a partir de los resultados previos en la Figura 4.11.

En cuanto a SOLSR, el flujo del tráfico de vídeo es continuo durante todo el experimento, debido a la selección de la trayectoria alternativa (ruta 1). Por lo tanto, se obtiene un efecto positivo en cuanto a la calidad en el flujo de los datos, como se destaca en los resultados que se presentan en la Figura 4.13. En concreto, la Figura 4.13 (a) describe la mayor tasa de paquetes en recepción (97%) mediante la propuesta en comparación con el protocolo estándar (82%). La mejora permite a su vez alcanzar un nivel mayor de PSNR, como se aprecia en la Figura 4.13 (b) con un valor de 38 dB frente al mecanismo estándar (34 dB).

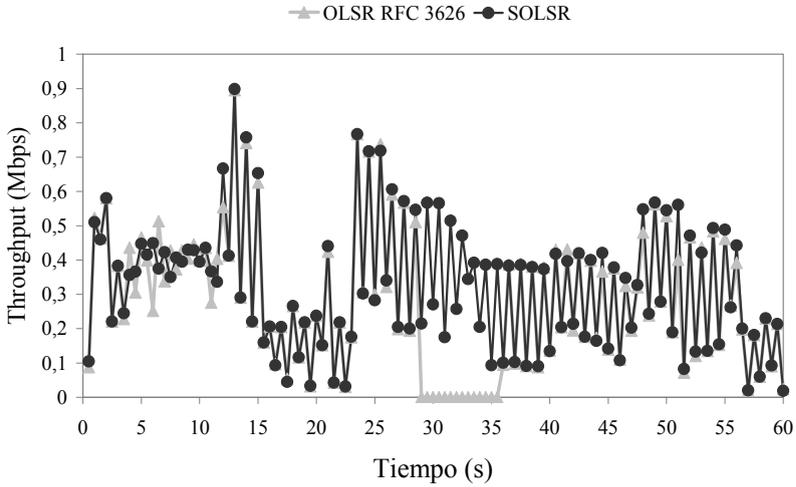


Figura 4.12 Throughput capturado sobre el dispositivo receptor (nodo 1)

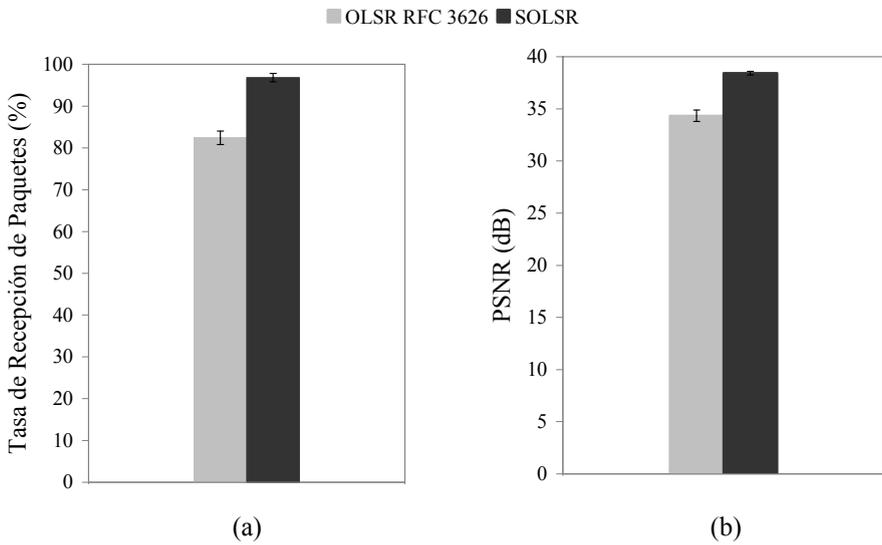


Figura 4.13 Evaluación de la calidad en el flujo de los datos. (a) Tasa de paquetes en recepción. (b) PSNR

Finalmente, se diseñó un experimento para evaluar la demanda de energía sobre el dispositivo con mayor valor estratégico (nodo 5) cuando se incrementa de forma significativa la carga de tráfico en la red. Con tal objetivo, adicional al flujo de vídeo entre los nodos 0 y 1, se configuraron flujos de vídeo simultáneos desde el nodo 2 al 8 y desde el nodo 3 al 9. En este caso, la evaluación se realizó durante un lapso de 360 segundos de la secuencia de vídeo y se estableció un agotamiento inicial de energía (50% de la capacidad) sobre el nodo 5. Además, la tarjeta inalámbrica se deshabilita automáticamente cuando el consumo supera el nivel crítico correspondiente al 90% de la capacidad inicial configurada, emulando de esta forma un estado de ahorro de energía (Figura 4.4). En la Tabla 4.3 se detallan los parámetros empleados en el experimento.

Tabla 4.3 Parámetros Empleados en la Configuración del Experimento

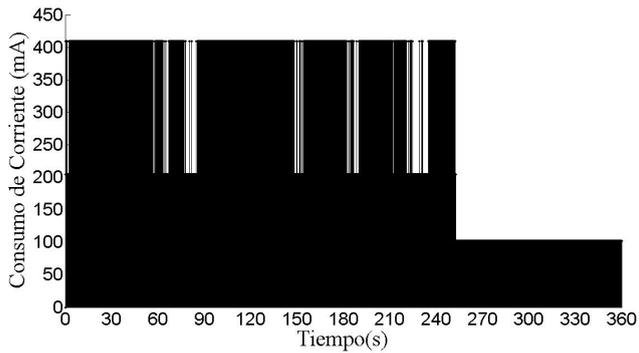
Parámetro	Descripción/Valor
Estándar	IEEE 802.11g
Potencia de Transmisión	0 dBm
Tasa de envío	54 Mbps
Tráfico Vídeo (Nodos: 0 al 1)	Secuencia: <i>Big Buck Bunny</i> [59] Duración: 360 segundos <i>Bit rate</i> promedio: 200 kbps
Tráfico Vídeo (Nodos: 2 al 8 y 3 al 9)	Secuencia: <i>Big Buck Bunny</i> [59] Duración: 360 segundos <i>Bit rate</i> promedio: 400 kbps
Energía Inicial	25 mAh

En la Figura 4.14, se presentan los resultados obtenidos a partir de las muestras de corriente capturadas por el sensor en el nodo 5. Cabe resaltar que en las gráficas se aprecia un nivel de consumo de corriente adicional con un valor aproximado de 100mA, dicho valor es el consumo de la tarjeta cuando el dispositivo es deshabilitado por el mecanismo de gestión implementado (Figura 4.4) y emula el estado de ahorro de energía.

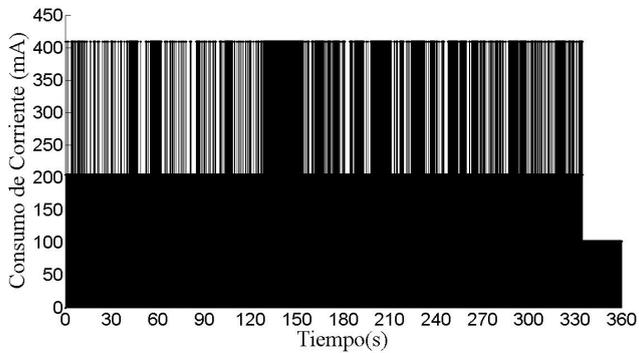
En cuanto a la evaluación, la Figura 4.14 (a) corresponde al conjunto de muestras capturadas durante la operación del protocolo OLSR estándar. Como se puede apreciar, existen intervalos significativos de permanencia en el estado de mayor consumo (409mA). Tal comportamiento describe la constante participación del nodo 5 en las rutas definidas por el mecanismo estándar para el envío de los flujos de tráfico. Como resultado, se alcanza el estado crítico de consumo aproximadamente a los 250s y, por tanto, la tarjeta se deshabilita.

Por otra parte, en la Figura 4.14 (b) se presenta el efecto del mecanismo SOLSR sobre el nodo 5. En concreto, se aprecia una disminución notable de los niveles de consumo

correspondiente al estado de transmisión. Dicho efecto es un indicador del establecimiento de las rutas a través de dispositivos alternativos al nodo 5 como segundo salto (nodos 4, 6 y 7). Por consiguiente, la reducción de la carga de tráfico permite extender la disponibilidad en la red del nodo con mayor valor estratégico. En este caso, el nivel crítico de consumo se alcanza aproximadamente a los 330s, lo cual representa un incremento del 22% para el intervalo del experimento (360s).



(a)



(b)

Figura 4.14 Muestras de corriente capturadas sobre el nodo 5. (a) OLSR estándar. (b) Mecanismo propuesto SOLSR

4.6. Conclusiones

En este capítulo se ha descrito la importancia de la metodología experimental basada en un *testbed* para la caracterización de una red ad hoc en entornos reales. Con tal objetivo, se realizó el diseño e implementación de un banco de pruebas mediante dispositivos embebidos de bajo coste (*Raspberry Pi*), así como una interfaz para la gestión remota de eventos basada en la librería *socket.io* de Node.js. A partir del desarrollo realizado, se resalta el esfuerzo significativo que conlleva la experimentación con *hardware*. Un aspecto importante a considerar es la compatibilidad de periféricos con las plataformas de desarrollo y el soporte del modo de comunicación ad hoc de una tarjeta inalámbrica.

Por otra parte, adicional al análisis de métricas de tráfico, se incluyó un mecanismo para la captura del gasto de energía mediante un sensor que permite un muestreo de los niveles de corriente que demanda la interfaz inalámbrica. Las variaciones entre dichos niveles es una característica inherente al *hardware*. Para la tarjeta empleada en los nodos, se ha determinado dos valores de corriente correspondientes a un consumo base y la operación en modo transmisión. En tal sentido, la evaluación del esquema de optimización se enfocó en verificar el establecimiento de las rutas acorde al mecanismo diseñado, así como el impacto sobre el dispositivo de mayor conectividad. Los resultados de los estudios describen que la estrategia permite prevenir la pérdida de conectividad evitando dispositivos con niveles críticos de energía. Tal comportamiento resulta en un mayor porcentaje de paquetes en recepción y un nivel mayor de PSNR comparado con el protocolo estándar.

Adicionalmente, la conformación de rutas alternativas a través del mecanismo SOLSR permite extender el tiempo de vida en los nodos con mayor conectividad en la red, incluso bajo una carga significativa de tráfico. Específicamente, el experimento desarrollado describe un tiempo de operación adicional de 80s frente al mecanismo OLSR estándar, correspondiente a un incremento del 22% para el intervalo de evaluación del *test* realizado (360s).

Capítulo 5

Despliegue y Evaluación de Redes Inalámbricas Ad Hoc Multi-Hop

En este capítulo se presentan estudios y aplicaciones desarrolladas empleando el conjunto de nodos ad hoc descritos en el Capítulo 4. Los estudios tienen como objetivo analizar la operación de una red ad hoc en un entorno real. En primer lugar, se desarrolló un estudio de viabilidad acerca de la aplicación de una red ad hoc multi-hop para la implementación de un sistema de vídeo portero inalámbrico. Específicamente, se realizó el despliegue de los nodos en un edificio conformando una topología lineal y se evaluaron parámetros de conectividad, throughput y pérdidas durante la transmisión del vídeo. Por otra parte, como segunda aplicación se realizó el diseño e implementación de una arquitectura de vídeo monitorización enfocada en entornos agrícolas, para lo cual se implementó un nodo prototipo, el cual incluye un conjunto de dispositivos sensores que permiten la captura de variables ambientales (presión, humedad, temperatura y geo-localización). Finalmente, se resalta un trabajo futuro centrado en la aplicación de una red ad hoc multi-hop como red de conectividad para un sistema de captura y generación de mapas de ruido de un entorno urbano.

5.1. Sistema de Vídeo Portero Inalámbrico para Edificios

En esta sección, se presenta un primer estudio de aplicación para redes ad hoc, propuesto a partir de la experiencia adquirida en el diseño y análisis de experimentos con el equipamiento descrito en el Capítulo 4. El trabajo se enfoca en un estudio de viabilidad sobre la aplicación de redes inalámbricas *multi-hop* en la implementación de un sistema de vídeo portero inalámbrico para edificios.

El estudio se efectuó dentro del proyecto “Desarrollo y Evaluación de un Prototipo con Tecnología Ad Hoc para Sistemas de Vídeo Porteros” suscrito entre una empresa de Vídeo Porteros y el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) perteneciente a la Universitat Politècnica de València (UPV). La propuesta del proyecto representa una solución alternativa para el despliegue de los sistemas de comunicación en edificios empleando tecnología inalámbrica.

Para la evaluación, se diseñaron un conjunto de experimentos con el objetivo de analizar la operación de la red considerando los requisitos de conectividad y calidad de servicio que demanda el flujo de tráfico generado por los dispositivos terminales (placas de vídeo portero). Específicamente, los experimentos se enfocaron en determinar la máxima distancia de transmisión obtenida con los nodos ad hoc implementados, así como la caracterización del comportamiento del *throughput* en una topología lineal de longitud variable (hasta nueve nodos). Finalmente, se realizó el despliegue y evaluación del sistema de vídeo portero inalámbrico tanto en las instalaciones de la Universidad como en el edificio de la empresa. En los apartados 5.1.1, 5.1.2 y 5.1.3, que se presentan a continuación, se detallan los experimentos desarrollados, así como los resultados obtenidos.

5.1.1. Análisis de la distancia efectiva de transmisión

En este experimento, se emplearon dos nodos con el objetivo de caracterizar la distancia máxima de transmisión de la tarjeta inalámbrica disponible en los nodos. El experimento consistió en ubicar al nodo receptor a diferentes distancias del nodo transmisor, con incrementos de 1 metro en la distancia y para cada caso se evaluó el porcentaje de paquetes obtenidos en recepción.

Para éste primer análisis, se empleó como tráfico el intervalo de 60 segundos de la secuencia de vídeo “*Big Buck Bunny*” [59], detallada previamente en la Tabla 4.2. Para la captura y análisis de los datos se empleó la herramienta *Topdump* [121], y para la transmisión del tráfico se empleó la herramienta *Mp4Trace* de Evalvid [99]. Dichas herramientas fueron instaladas previamente en los nodos como se describió en el Apartado 4.3.1. En la Tabla 5.1, se detallan los parámetros del experimento, adicionalmente, en la Figura 5.1, se presenta una fotografía capturada durante el desarrollo del experimento en las instalaciones de la UPV (Sector Ciudad Politécnica de la Innovación).

Tabla 5.1 Parámetros del Experimento para Determinar la Distancia de Transmisión

Parámetro	Descripción/Valor
Tarjeta Inalámbrica	Awus036NH [40]
Estándar	IEEE 802.11g
Potencia de Transmisión	0 dBm
Tasa de envío	54 Mbps
Sensibilidad en Recepción	-76 dBm
Ganancia de la Antena	5 dBi
Tráfico Vídeo	Secuencia: <i>Big Buck Bunny</i> [59] Duración: 60 segundos <i>Bit rate</i> promedio: 300 kbps

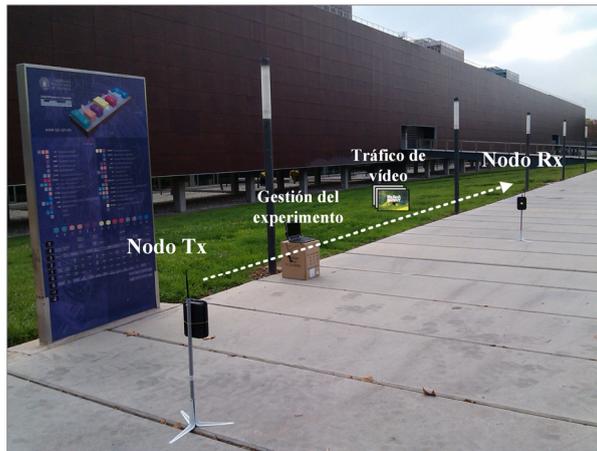


Figura 5.1 Experimento para determinar el rango de transmisión de los nodos ad hoc

En la Figura 5.2, se presentan los resultados del experimento. Las curvas obtenidas describen el comportamiento de la tasa de recepción de paquetes, así como el nivel de PSNR según la distancia entre los nodos transmisor y receptor. Como se puede apreciar, la tasa de recepción permanece constante dentro de un rango aproximado de 30 metros, con un porcentaje cercano al 100%. En cuanto a las distancias superiores al límite de 30 metros, los resultados muestran variaciones significativas en el porcentaje de paquetes detectados por el nodo receptor, con una tendencia al incremento de las pérdidas conforme es mayor la distancia.

Las variaciones indican que, en la zona posterior a los 30 metros, los parámetros de configuración de la tarjeta no aseguran un nivel de potencia que supere el umbral de recepción. Por consiguiente, dicha zona es altamente susceptible a la pérdida de datos.

Específicamente, el porcentaje de paquetes en recepción se reduce a cero aproximadamente a los 59 metros. En cuanto al nivel de PSNR para las distintas ubicaciones del nodo receptor, el comportamiento de la curva se corresponde con los resultados previos, es decir con una zona estable y posteriormente un intervalo caracterizado por variaciones. Cabe resaltar, que en la zona de inestabilidad el nivel resultante de PSNR depende del tipo de *frame* al que pertenezcan los paquetes donde ocurren las pérdidas.

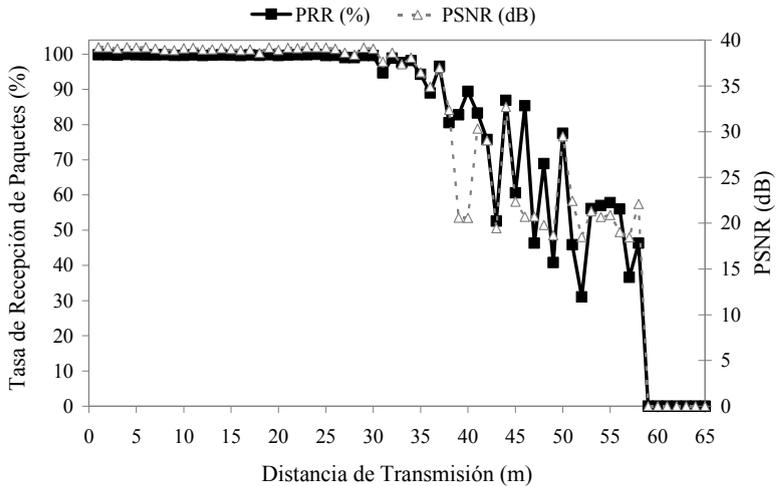


Figura 5.2 Tasa de recepción de paquetes y nivel de PSNR según la distancia de transmisión

5.1.2. Caracterización del throughput en una topología lineal

A partir de la distancia de transmisión (30m) determinada en el estudio previo, a continuación, se desarrolló un experimento con el fin de caracterizar el *throughput* efectivo sobre una topología lineal de longitud variable. Para minimizar el efecto de la interferencia entre los nodos ubicados a dos saltos, los dispositivos se ubicaron a la distancia aproximada de 30 metros. El estudio se replicó hasta conformar una cadena de nueve nodos. Además, se empleó el protocolo OLSR estándar para la conformación del escenario *multi-hop*. En la Figura 5.3, se presenta un esquema descriptivo del escenario desplegado.

Para el desarrollo del experimento se empleó la herramienta Iperf [120], la cual consiste en un generador de tráfico tipo CBR. Dicha herramienta permite definir flujos de datos a una tasa configurable y por tanto es posible emular diferentes niveles para la carga del tráfico demandado en la red. Adicionalmente, una vez transmitido un flujo de datos, la herramienta genera un informe acerca del *throughput* efectivo en el escenario. Para el estudio se definió un total de 24 flujos de tráfico con un rango desde 100kbps hasta

54Mbps. El comportamiento de los flujos de datos se analizó para las diferentes longitudes de la topología lineal desplegada (desde dos hasta nueve nodos).

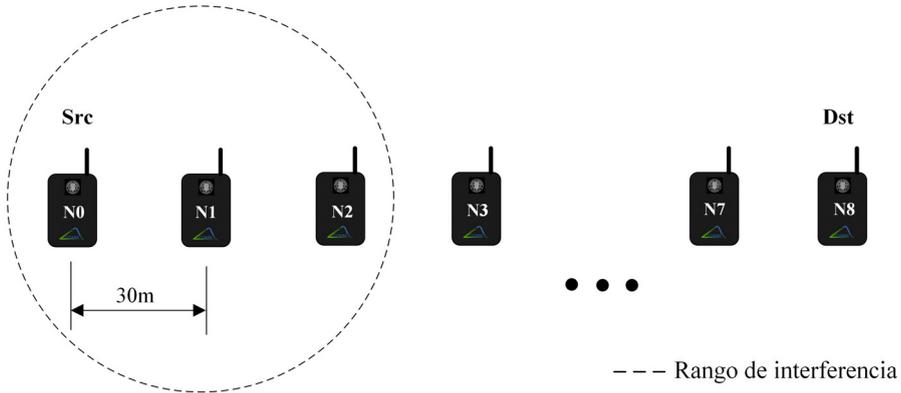


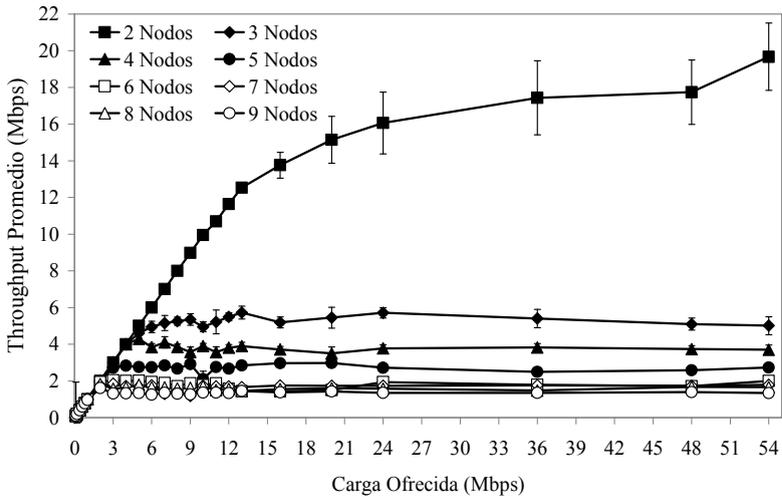
Figura 5.3 Diagrama descriptivo de la topología lineal desplegada para la caracterización del *throughput*

En la Figura 5.4, se presentan los resultados del experimento, el análisis estadístico se realizó para un nivel de confianza del 95%. Las gráficas en la Figura 5.4 (a), describen el patrón de comportamiento del *throughput* sobre el nodo receptor (para los diferentes longitudes de la cadena de nodos), en comparación con la carga teórica ofrecida. Como se puede apreciar, en primera instancia las curvas describen una zona lineal, la misma que se reduce conforme se incrementa la longitud de la cadena. Para el caso de 2, 3, 4, 5, 6 nodos, dicho intervalo se extiende aproximadamente hasta los 13Mbps, 5 Mbps, 4Mbps 3Mbps y 2Mbps, respectivamente. La degradación del *throughput* en el escenario es resultado del mecanismo de acceso al medio, así como debido a la señalización requerida durante el flujo de los datos (mensajes ACK), [35], [36].

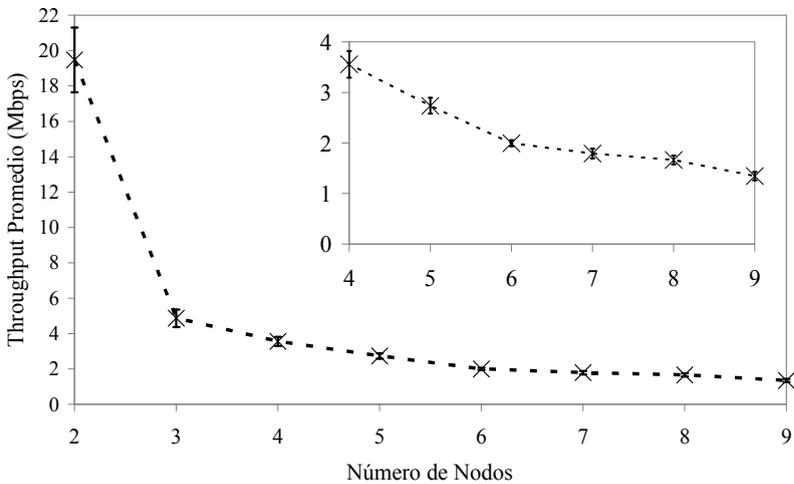
En particular, durante el proceso de contienda, cuando un nodo obtiene acceso al canal, su operación limita el acceso de los dispositivos vecinos dentro del rango de interferencia. Por consiguiente, conforme se incrementa el número de nodos, existe un incremento en la contienda por el acceso y una reducción en la capacidad efectiva para transmitir los datos.

Con respecto a los casos desde 7 y hasta 9 nodos, las gráficas presentan un intervalo lineal muy similar, con un valor límite cercano a los 1.5Mbps. Este comportamiento, es resultado de un nivel máximo de congestión alcanzado en el medio para dichas longitudes en la cadena de nodos. Por otra parte, posterior a los intervalos lineales, las diferentes gráficas describen un comportamiento de mayor estabilidad, caracterizado por un valor umbral del *throughput*. En tal sentido, en la Figura 5.4 (b), se presentan los resultados de los niveles de *throughput* para la carga de tráfico ofrecida de 54Mbps, en las diferentes longitudes de la topología lineal. Como se puede apreciar, para el caso de

dos nodos se alcanza un máximo aproximado de 19Mbps, mientras que para las cadenas conformadas desde tres hasta nueve nodos, los valores umbrales, son muy cercanos a los límites descritos previamente para los intervalos lineales. Dichos valores se emplean como referencia para el estudio que se describe a continuación en el apartado 5.1.3.



(a)



(b)

Figura 5.4 Análisis del tráfico en la topología lineal variable. (a) Comparación entre la carga ofrecida y el *throughput* promedio. (b) Comportamiento del *throughput* según el número de nodos

5.1.3. Evaluación de una red ad hoc multi-hop en un edificio tipo

Para evaluar la viabilidad del sistema de vídeo portero inalámbrico con tecnología ad hoc, se realizó el despliegue de la topología lineal *multi-hop* en un edificio tipo ubicado en las instalaciones de la UPV (Edificio 8B, Ciudad Politécnica de la Innovación). En la Figura 5.5, se presenta un esquema descriptivo de la red ad hoc desplegada. La ubicación, así como el número de dispositivos se definió a partir de pruebas desarrolladas para comprobar la conectividad entre los nodos considerando la distribución del edificio (ubicación de oficinas, puertas de acceso, etc). En el estudio, se empleó ordenadores portátiles provistos de cámara y micrófono para emular la operación de los dispositivos terminales (placas del vídeo portero). En la Figura 5.5 (a), se presenta la vista lateral del edificio. Como se aprecia, los nodos N3, N4 y N5 se ubicaron en los descansos intermedios de las plantas cero, uno y dos respectivamente, dicha ubicación permite mantener la conectividad vertical en la red. En la Figura 5.5 (b), se presenta la vista frontal del escenario. En este diagrama, se resalta la ubicación de los nodos terminales N0 y N1 (ordenadores portátiles) a lo largo de las plantas cero y tres, respectivamente. Además, se requirió ubicar nodos intermedios (dispositivos N2 y N6), en los puntos de acceso a dichas plantas para garantizar la conectividad horizontal.

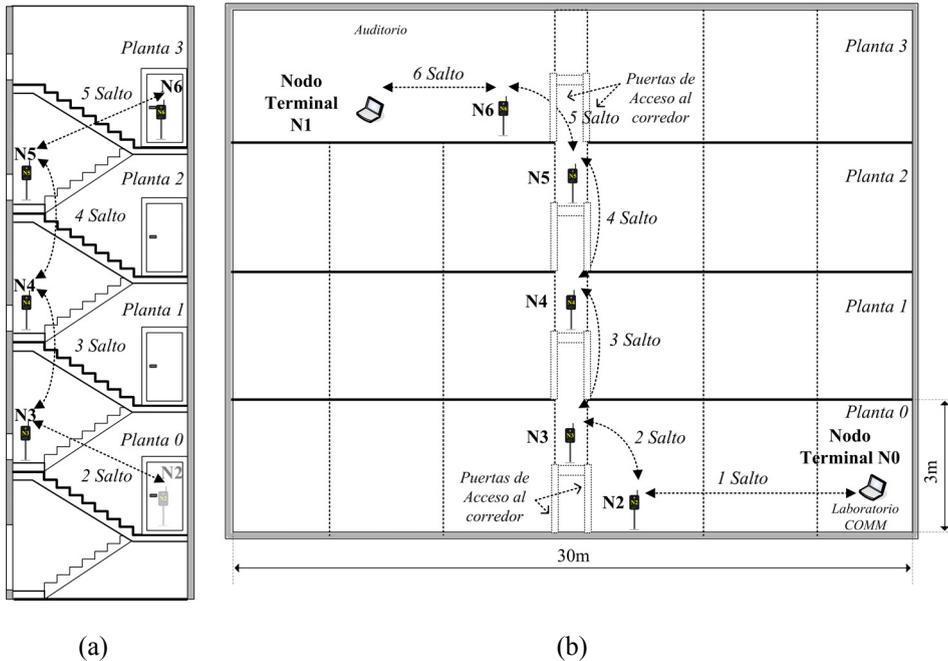


Figura 5.5 Despliegue de una red ad hoc *multi-hop* en el Edificio 8B (CPI), Universitat Politècnica de València, para el estudio del sistema de vídeo portero inalámbrico.

(a) Vista lateral. (b) Vista frontal

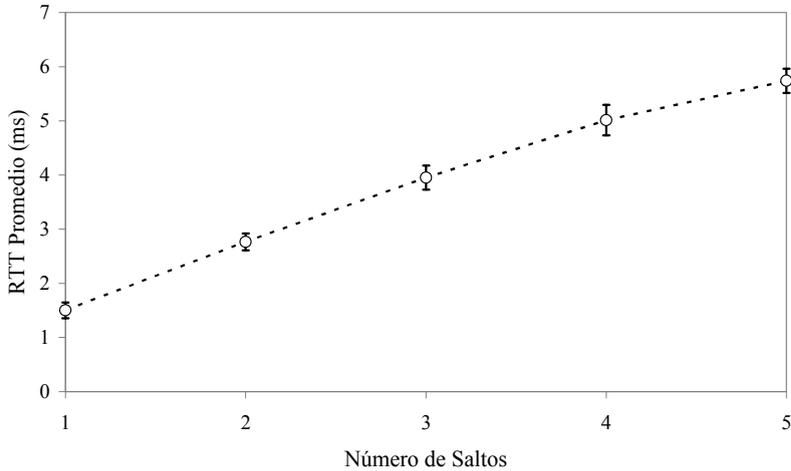


Figura 5.6 Análisis de la métrica RTT según el número de saltos

En primera instancia, las evaluaciones se enfocaron en la operación de los dispositivos intermedios. En tal sentido, en la Figura 5.6, se presentan resultados del análisis de conectividad entre el nodo terminal N0 hacia cada uno de los nodos intermedios (desde N2 hasta N6). La gráfica describe el comportamiento de la métrica RTT (*Roud Trip-delay Time*), la misma que proporciona información acerca del tiempo que demora un paquete (ICMP, *Internet Control Message Protocol*) en alcanzar el destino y retornar al dispositivo origen. Como se aprecia, existe una tendencia de incremento en el valor RTT conforme se incrementa el número de saltos, con un valor mínimo de 1.5ms para el caso de un salto y un máximo de 5.7ms para cinco saltos. Los valores obtenidos se encuentran muy por debajo del retardo máximo recomendado para aplicaciones de llamadas de voz, datos interactivos y vídeo conferencia según la norma UIT-T G.114 [131] (máximo 400ms en un sentido). Por tanto, este primer análisis verifica la conformación adecuada de los enlaces entre los nodos.

A continuación, se realizó un estudio acerca del comportamiento del tráfico sobre el dispositivo intermedio más alejado (nodo N6, 5 saltos). En este experimento, se empleó el generador de tráfico CBR (herramienta Iperf) para configurar flujos de datos sobre el nodo terminal N0 (ordenador portátil) con una demanda desde 100kbps hasta 1Mbps (incrementos de 100kbps). Dicho rango se definió con la finalidad de estudiar diferentes posibilidades en cuanto a la carga de tráfico requerida por los dispositivos terminales del sistema de vídeo portero. Las características del experimento se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Parámetros de Evaluación Empleando Tráfico CBR

Parámetro	Descripción/Valor
Dispositivo Transmisor	Nodo 0
Dispositivo Receptor	Nodo 6
Protocolo de Enrutamiento	OLSR estándar
Número de Saltos	5
Tráfico (Iperf)	Tipo: CBR (Paquetes UDP) Rango: 100kbps hasta 1Mbps Incrementos: 100kbps Número de Flujos: 10 Iteraciones por flujo: 5

En la Figura 5.7, se presentan los resultados del estudio. La Figura 5.7 (a), describe el comportamiento del *throughput* con respecto a la carga ofrecida, para el intervalo de análisis (100kbps a 1Mbps). Como se aprecia, la curva presenta una característica lineal. Dicha tendencia, es el comportamiento esperado para el escenario considerando los resultados previos obtenidos en la topología lineal con longitud variable (Apartado 5.1.2), con la particularidad que este caso no existe visibilidad (línea de vista directa) entre los nodos desplegados en el edificio (Figura 5.5).

Por otra parte, en la Figura 5.7 (b), se presenta el porcentaje de paquetes perdidos para los diferentes flujos de datos. Como se puede apreciar, la curva obtenida no presenta una tendencia definida para los incrementos en la carga de tráfico. Además, cabe resaltar la variabilidad descrita por los intervalos de confianza (95%) para las iteraciones de cada flujo. Este comportamiento, se atribuye a la existencia de redes adicionales en el edificio, que operan en el mismo canal, así como en canales adyacentes, lo que ocasiona un nivel de interferencia. No obstante, dichas condiciones de operación, los niveles promedio de pérdidas son reducidos, con un valor mínimo aproximado de 0.5% (500kbps) y un máximo promedio de 2.6% (800kbps).

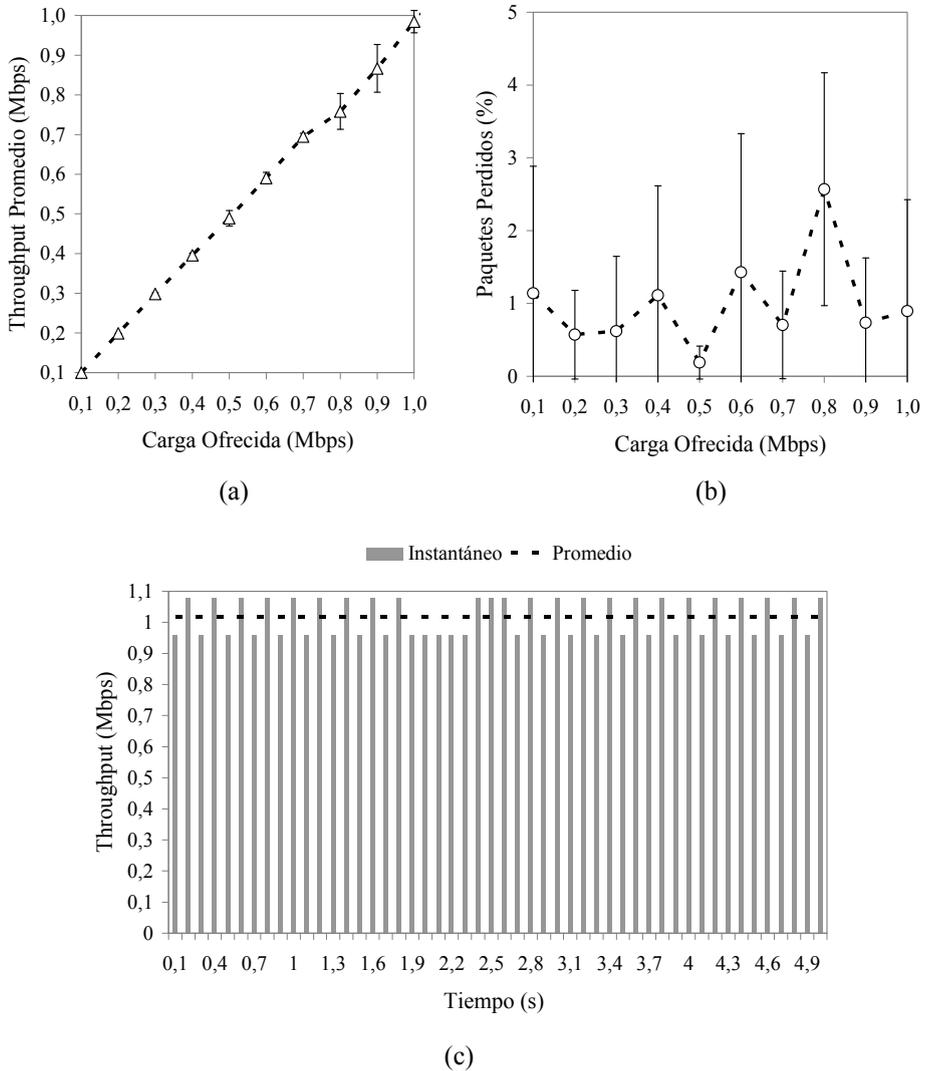


Figura 5.7 Evaluación del tráfico sobre el nodo intermedio N6. (a) *Throughput* promedio. (b) Tasa de pérdida de paquetes. (c) Perfil del tráfico

Adicionalmente, en la Figura 5.7 (c), se presenta un análisis del *throughput* instantáneo en el dispositivo receptor (nodo N6). Específicamente, se presenta un intervalo de 5 segundos para una de las iteraciones del flujo de datos con una carga de 1Mbps. Dicha gráfica proporciona una descripción visual acerca del perfil de tráfico en el escenario, así como la ocurrencia de posibles variaciones en el *bit rate* durante el experimento. Los valores instantáneos de *throughput* se determinaron mediante el análisis de las trazas

capturadas en el nodo N6, con un intervalo de muestreo de 100ms. Como se puede apreciar, existe una variación mínima entre los valores instantáneos de *throughput* y el nivel promedio (1Mbps) del conjunto de las muestras, lo que verifica la característica constante del tráfico empleado en el experimento (CBR).

A partir de los resultados obtenidos, a continuación se efectuó un estudio para evaluar la transmisión de los flujos de audio y vídeo entre los nodos terminales N0 y N1, correspondiente a los ordenadores portátiles ubicados en las plantas cero y tres del edificio, respectivamente (Figura 5.5). Para el experimento, se configuró un flujo unidireccional del tráfico (audio-vídeo) desde el nodo N1 hacia el nodo N0. El proceso de captura, codificación y transmisión se realizó empleando la herramienta Ffmpeg [62]. En el Apéndice B.4, se presentan los detalles de la configuración. Con respecto, a la codificación del vídeo, se empleó el parámetro *bit rate* con una tasa desde 200kbps hasta 1Mbps (incrementos de 100kbps), mientras que para la codificación del audio, se definió una tasa única de 32kbps para todos los casos. A continuación, los datos codificados se multiplexaron en un flujo TS (*Transport Stream*) y se realizó la transmisión de los mismos, empleando UDP como protocolo de transporte. Además, para el experimento se ubicó un objeto dinámico como elemento de prueba frente a la cámara del nodo transmisor (N1). La duración de cada prueba fue de 60 segundos. En la Tabla 5.3 se presentan los parámetros característicos del experimento.

Tabla 5.3 Parámetros para la Evaluación del Tráfico de Audio-Vídeo

Parámetro	Descripción/Valor
Dispositivo Transmisor	Nodo 1
Dispositivo Receptor	Nodo 0
Número de Saltos	6
Protocolo de Enrutamiento	OLSR estándar
Tráfico Vídeo	Codificación: H.264 Frames por segundo: 16 GOP: 16 Tasa codificación: 200kbps hasta 1Mbps Iteraciones por flujo: 1
Tráfico Audio	Codificación: AAC (<i>Advanced Audio Coding</i>) <i>Bit rate</i> Promedio: 32kbps Número de Canales: 1
Tiempo de Análisis	60 segundos

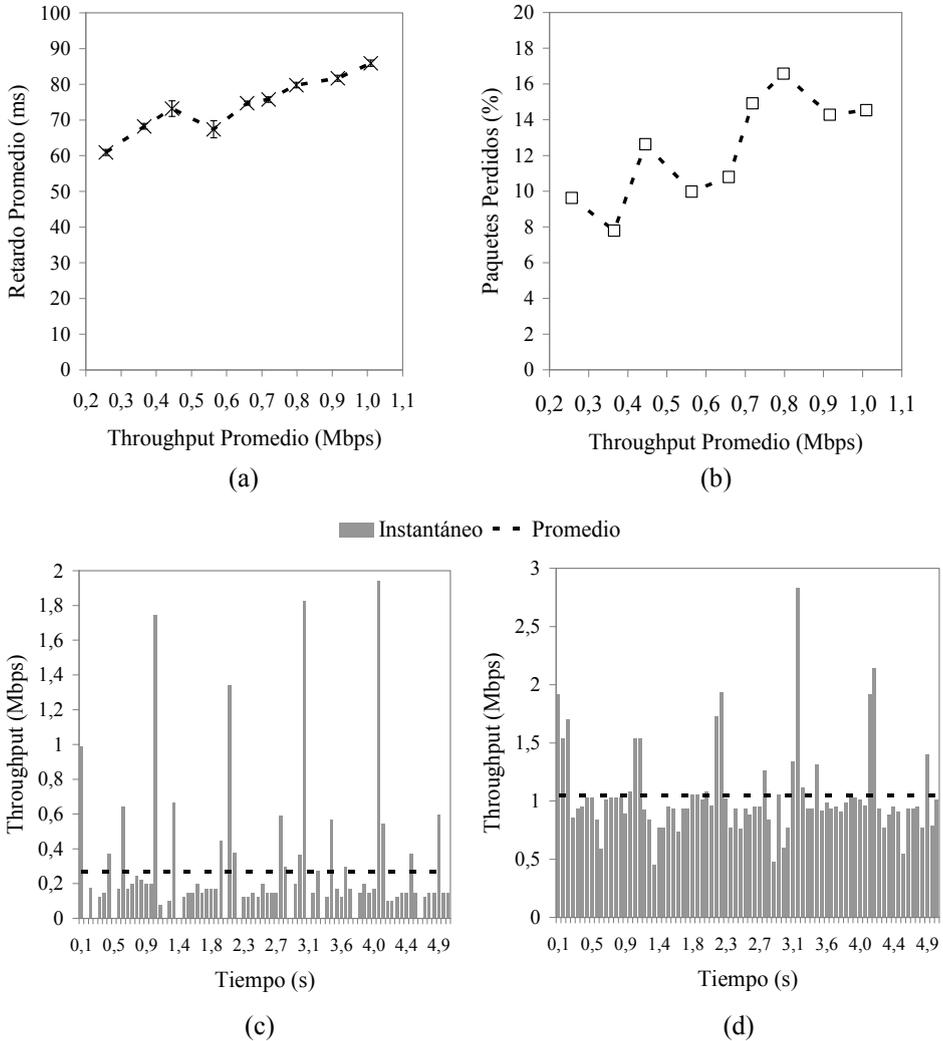


Figura 5.8 Evaluación y perfil del tráfico (audio-vídeo) unidireccional entre los nodos terminales N1 y N0. (a) Retardo promedio. (b) Tasa de pérdida de paquetes. (c) Flujo resultante 257kbps. (d) Flujo resultante 1009kbps

En la Figura 5.8, se presentan los resultados del estudio. La Figura 5.8 (a), describe el comportamiento del retardo para los diferentes valores del flujo de tráfico resultante de la multiplexación del audio y el vídeo. Los valores promedio del retardo se obtuvieron mediante la diferencia de las marcas de tiempo entre los paquetes capturados en el nodo receptor y transmisor y que presenta el mismo identificador. Como se aprecia, la curva describe una tendencia incremental, conforme es mayor el tráfico resultante, con un

valor mínimo de 61ms para un *throughput* de 257kbps y un retardo máximo promedio de 86ms para el flujo resultante de 1009kbps. Los valores obtenidos se mantienen por debajo del límite recomendado de 400ms de acuerdo a la norma UIT-T G.114 [131], sin embargo, cabe resaltar que los resultados no incluyen el retardo generado por los procesos de codificación y reproducción del vídeo en los nodos terminales.

Por otra parte, con respecto al porcentaje de pérdida de paquetes, los resultados en la Figura 5.8 (b), describen un comportamiento variable, con un mayor porcentaje de pérdidas para los flujos de mayor *throughput* resultante. Específicamente, el menor porcentaje de pérdidas fue de aproximadamente 8% (365kbps) y el mayor de 16.5% para un *throughput* promedio de 798kbps. En particular, se resalta el incremento de las pérdidas en comparación con los resultados presentados en la Figura 5.7 (b), empleando tráfico tipo CBR. Para analizar este comportamiento, en las Figuras 5.8 (c) y 5.8 (d), se presentan los perfiles del tráfico para un intervalo de 5 segundos de los flujos resultantes, mínimo (257kbps) y máximo (1009kbps), respectivamente. El análisis de los valores instantáneos de *throughput* se realizó acorde al *frame rate* definido en la codificación del vídeo (Tabla 5.3), es decir con un intervalo de muestreo de 0.0625segundos (1/fps).

Como se puede apreciar, las gráficas describen una variación significativa del *bit rate*, a lo largo de los intervalos. Dicho comportamiento de ráfagas instantáneas es una característica del tráfico de vídeo [132]. En particular, los *frames* tipo I (*Intra-frame*), demandan una mayor cantidad de información en relación al tipo P (*Predicted*) y B (*Bi-Predicted*), lo que ocasiona un conjunto de picos con valores muy por encima del *throughput* promedio del tráfico. Para el caso del flujo de 257kbps evaluado en la Figura 5.8 (c), el pico máximo alcanza un nivel aproximado de 1.9Mbps, lo que representa una demanda instantánea de tráfico que excede en más de siete veces el valor medio. En cuanto al perfil de flujo resultante de 1009kbps presentado en la Figura 5.8 (d), la máxima demanda instantánea es de aproximadamente 2.8Mbps. Por tanto, el comportamiento de las ráfagas genera una demanda de tráfico que excede en instantes la capacidad disponible en la topología lineal (Figura 5.4), lo que resulta en el incremento de la tasa de pérdidas.

Por otra parte, en la Figura 5.9, se presentan algunos ejemplos del vídeo capturado en el nodo receptor N0, para diferentes tasas de codificación. Las gráficas permiten realizar un análisis subjetivo sobre la calidad del vídeo. Las Figuras 5.9 (a) y 5.9 (b), corresponden a los flujos de vídeo codificados a una tasa promedio de 300kbps y 400kbps, respectivamente. Como se aprecia, en estos casos las imágenes instantáneas capturadas describen una calidad adecuada del vídeo en recepción. Posteriormente conforme se incrementa la tasa de codificación a 500kbps, es posible apreciar distorsiones moderadas en la imagen. Finalmente, la degradación es más evidente y se incrementa de forma significativa para tasas de codificación superiores, como se puede apreciar en las imágenes de las Figuras 5.9 (d), 5.9 (e) y 5.9 (f), correspondientes a tasas de codificación del vídeo desde 600kbps, 700kbps y 800kbps, respectivamente. Por lo tanto, a partir de los resultados se establece un flujo de 400kbps como un valor límite

recomendable para la implementación del sistema de vídeo portero inalámbrico empleando tecnología de comunicación ad hoc.

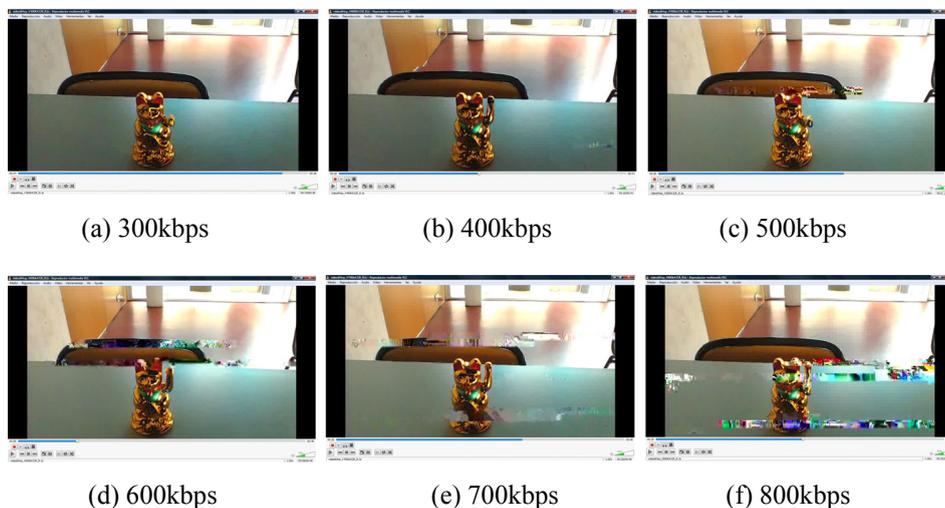


Figura 5.9 Imágenes del vídeo capturado en el nodo receptor N0, para diferentes tasas de codificación

5.2. Sistema de Video Monitorización para Entornos Agrícolas

En esta sección, se presenta la segunda propuesta de aplicación enfocada en el diseño e implementación de una arquitectura prototipo de vídeo monitorización para entornos agrícolas. El proyecto es parte de una actividad conjunta propuesta por el Grupo de Comunicaciones Multimedia de la Universitat Politècnica de València (COMM-UPV) y la Universidad Santo Tomás (Colombia), dentro del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - Red Temática RiegoNets (514RT0486). En concreto, el planteamiento consiste en el desarrollo de nodos ad hoc mediante plataformas *hardware* de bajo coste para el despliegue de una red de sensores en zonas agrícolas. Con tal objetivo, se implementó un nodo ad hoc prototipo, el cual incluye un conjunto de sensores para la captura de variables ambientales (temperatura, presión y humedad) y datos de geo-localización. El prototipo diseñado, incluye además una cámara de vídeo (*webcam*) para la monitorización del entorno. Por otra parte, se desarrolló una aplicación *web* basada en Node.js [123], para el acceso remoto a los datos adquiridos por los sensores y la visualización del vídeo. Dicha aplicación permite adicionalmente obtener información sobre el estado del nodo (carga de CPU, consumo de energía y temperatura). A continuación, se detalla el trabajo realizado.

5.2.1. Nodo ad hoc prototipo

En la Figura 5.10, se presenta el diagrama funcional del nodo ad hoc prototipo. La estructura y configuración del nodo está basado en el desarrollo previo realizado para el *testbed* detallado en el Capítulo 4 (Apartado 4.3.1). En este caso se empleó una versión actualizada de la plataforma de desarrollo (*Raspberry Pi 2*).

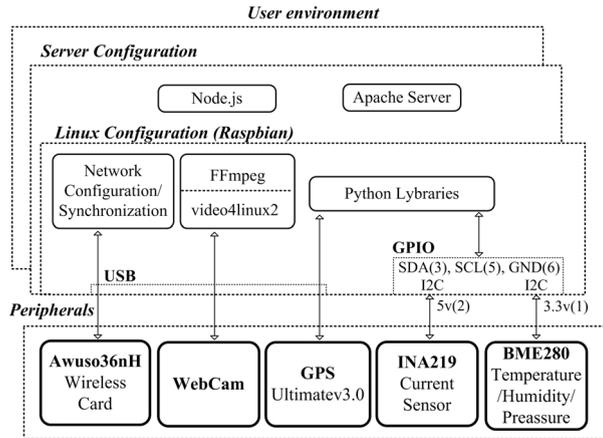


Figura 5.10 Diagrama funcional y periféricos instalados en el nodo prototipo

Como se aprecia, la implementación cuenta con un total de cinco dispositivos periféricos. La configuración del modo de comunicación ad hoc, se realizó mediante los archivos *interfaces* y *wpa_supplicant.conf* del sistema operativo Linux disponible en la plataforma (distribución Raspbian). Además, se instaló un cliente NTP (*Network Time Protocol*), para la sincronización del nodo durante el inicio de su operación. En cuanto al *hardware*, se seleccionó la tarjeta Awus036nh [40], que soporta dicho modo de comunicación y es compatible con la plataforma de desarrollo. Para la captura del vídeo, se empleó una *webcam* (5.7MP/HD720p). El proceso de captura y codificación de vídeo se realiza con la herramienta de libre distribución FFmpeg [62]. En cuanto a los sensores, se instaló un dispositivo GPS (Ultimate v3.0) [41] con conexión USB a la plataforma (cable TTL-USB), así como sensores con comunicación I2C. En concreto el sensor de corriente INA219 [118] que opera a 5V y el sensor BME280 [42], que permite adquirir información de temperatura, humedad y presión y opera a 3.3V. Los sensores son manejados por un conjunto de librerías desarrolladas por Adafruit [133].

Para el suministro de energía, se empleó una batería de litio (*power bank*) de 10000 mAh. En la Figura 5.11, se presentan fotografías de la implementación. En la Figura 5.11 (a), se detallan los componentes del nodo prototipo y en la Figura 5.11 (b), se presenta el montaje del nodo para el desarrollo de experimentos de campo.

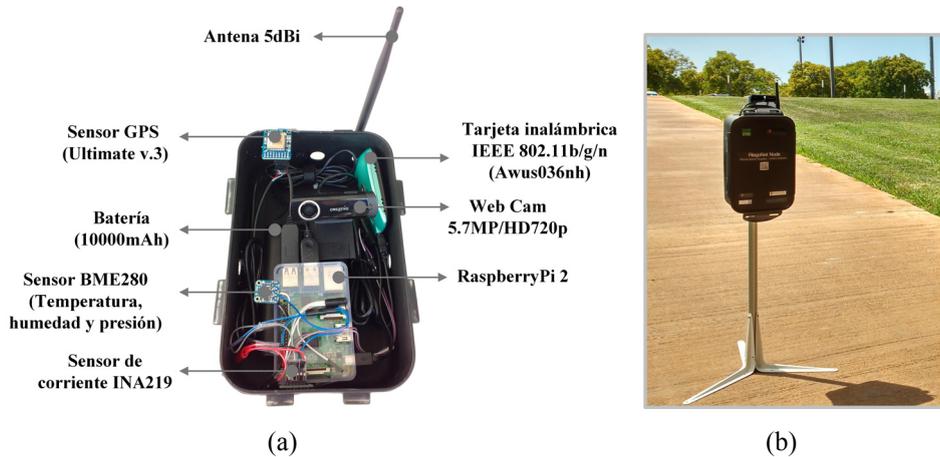


Figura 5.11 Nodo ad hoc prototipo. (a) Dispositivos empleados. (b) Montaje y despliegue del nodo

5.2.2. Arquitectura de gestión

En la Figura 5.12, se presenta el diagrama funcional del sistema de vídeo monitorización implementado sobre el nodo prototipo previamente descrito. En particular, se instaló y configuró sobre la plataforma (*Raspberry Pi*) un servidor HTTP basado en Node.js (v0.10.2) [123]. El acceso al servidor se realiza mediante el navegador (*browser*) a través de la librería *socket.io* [124], que permite el intercambio de información y manejo de eventos en tiempo real. En la interfaz *web*, se habilitó un grupo de funcionalidades (mediante botones) con el objetivo de generar peticiones (*client messages*) para la activación de procesos gestionados por el servidor. Las peticiones consisten en: solicitudes de activación de la cámara *web*, información acerca del estado del nodo durante su operación y finalmente peticiones acerca de la información capturada por los sensores. Con respecto al control de la cámara, el servidor activa un proceso (*script* Linux), el cual permite la captura y codificación del vídeo mediante la herramienta FFmpeg [62]. Para el proceso de codificación se empleó el *codec* H.264 [61], específicamente el parámetro *bit rate* promedio. Además, se empleó el protocolo de transporte HLS (HTTP Live Streaming) [134] para la segmentación del vídeo y su inclusión en la *web*. Dichos segmentos, son almacenados en un servidor Apache configurado sobre el nodo prototipo.

Finalmente, la compatibilidad para la reproducción del vídeo en la interfaz *web*, se obtiene mediante un *Flash fallback* implementado en el código del reproductor *web*. En relación al estado del sistema, el servidor emite mensajes con información acerca de la carga y temperatura de la CPU, así como el consumo de energía de la plataforma a partir de un proceso de muestreo realizado por el sensor de corriente (INA219) [118]. De forma similar, los datos capturados por el sensor GPS y de variables ambientales, se procesan mediante *scripts* desarrollados en Python y a continuación el servidor genera

un conjunto de mensajes con la información sobre geo-localización, temperatura, presión y humedad. Además, la información distribuida en el bloque *server messages* se almacena en la tarjeta de memoria de la plataforma (*SD Card*), lo que permite disponer de un historial de las mediciones realizadas.

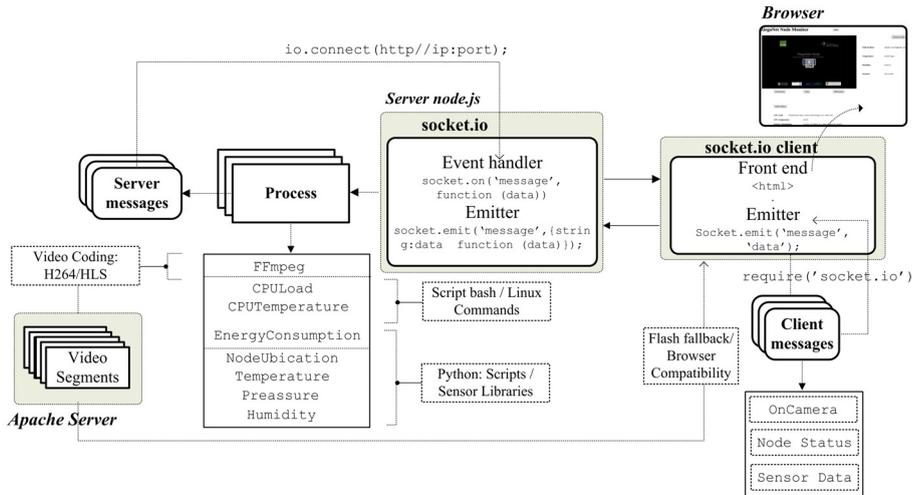


Figura 5.12 Diagrama funcional de la arquitectura de video monitorización implementada en el nodo prototipo

5.2.3. Evaluación del nodo prototipo

En la Figura 5.13, se presentan un conjunto de medidas experimentales que describen las características operativas del nodo prototipo, es decir durante la adquisición, procesamiento y transmisión de las variables capturadas por los sensores. En cuanto a los parámetros configurados para el procesamiento del vídeo, se empleó una tasa de codificación de 300kbps y una duración de 2 segundos para los segmentos HLS. En la Figura 5.13 (a), se presenta el comportamiento de la carga de CPU durante una hora de operación del nodo, las muestras se tomaron en intervalos de 1 minuto. Como se puede apreciar, los resultados indican una operación adecuada en cuanto a la carga de CPU sobre la plataforma, específicamente un promedio de 70%. Además, las variaciones obtenidas en la curva indican que la demanda de recursos de la CPU, generada por los sensores en conjunto con el proceso de codificación y transmisión del vídeo no ocasiona una sobrecarga continua sobre el prototipo.

Adicionalmente, en la Figura 5.13 (b), se presenta los resultados de la monitorización de temperatura sobre la CPU. Como se aprecia, la curva describe un comportamiento estable con valores mínimos y máximos registrados de 38°C y 44°C respectivamente, muy por debajo del nivel máximo (70°) descrito en las especificaciones técnicas [135],

cabe resaltar que la temperatura ambiente durante el desarrollo del experimento fue de 25°C.

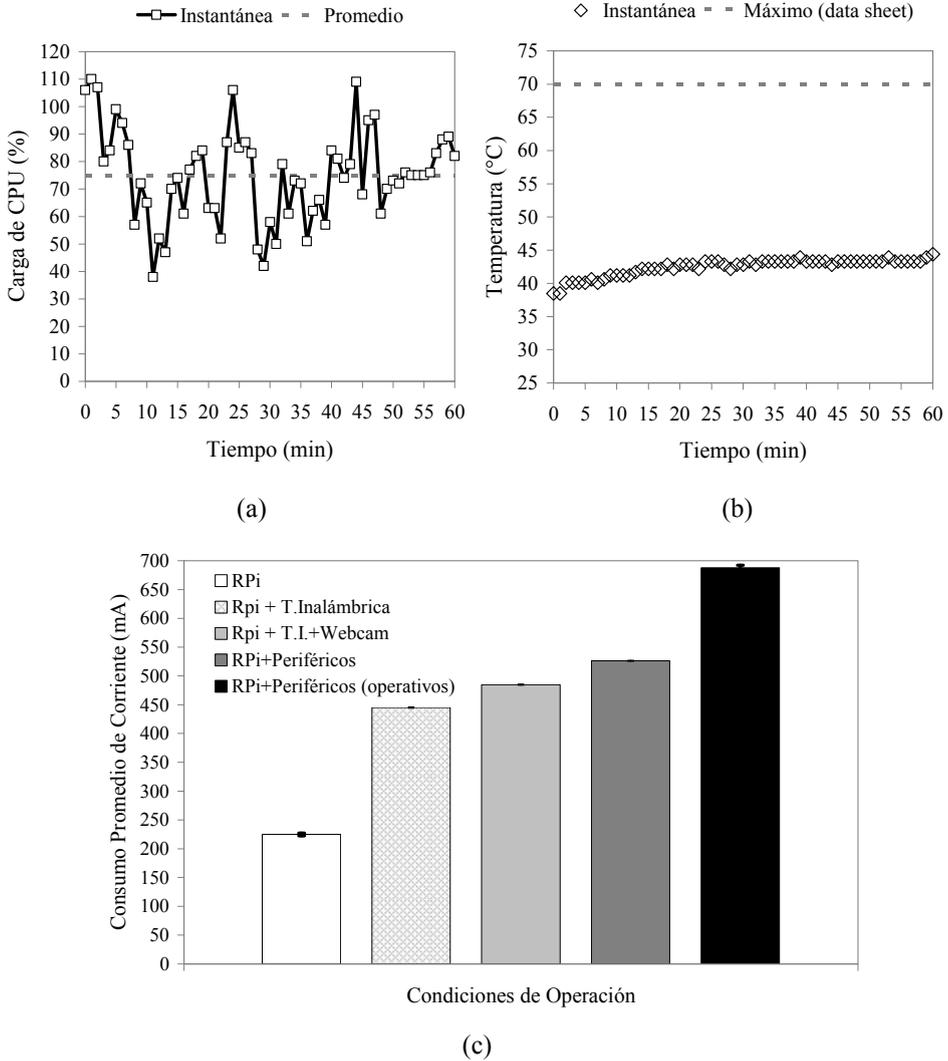


Figura 5.13 Evaluación del nodo ad hoc prototipo. (a) Carga de la CPU. (b) Temperatura de la CPU. (c) Consumo de corriente

Por otra parte en la Figura 5.13 (c), se presenta una caracterización de la corriente demandada conforme se incrementa funcionalidades (número de periféricos) en el nodo, dichos resultados fueron citados previamente en el Capítulo 2 (Apartado 2.1).

Como se puede apreciar, la plataforma (sin periféricos) presenta un consumo base aproximado de 224mA. Posteriormente, la inclusión de los dispositivos periféricos en estado no operativo, es decir desactivados, ocasiona incrementos en la demanda de corriente debido a un valor base de consumo inherente al *hardware*. Específicamente, la conexión de la tarjeta inalámbrica resulta en un consumo aproximado de 445mA, la inclusión de la *webcam* incrementa la demanda hasta 485mA, mientras que la conexión de los sensores de geo-localización y variables ambientales ocasiona un consumo total de 526mA. Finalmente, el consumo total del nodo con todos los sensores en estado operativo, alcanza una demanda de corriente aproximada de 687mA. En tal sentido, el tiempo estimado de operación del nodo es de aproximadamente 14.5 horas, considerando la capacidad de la batería empleada en el prototipo (10000mAh).

5.3. Trabajo Futuro

El diseño de la arquitectura de vídeo monitorización, implementación del nodo prototipo, así como los experimentos detallados, representan la primera etapa de las actividades conjuntas propuestas dentro de la Red Temática RiegoNets (CYTED - 514RT0486). Adicionalmente, se ha planificado la implementación de un conjunto de nodos ad hoc con las capacidades descritas (sensores ambientales, geo-localización, captura de vídeo) para su despliegue y evaluación sobre un entorno de *test* (campus universitarios). Además, se empleará en los prototipos, el protocolo de enrutamiento SOLSR, propuesto en el presente trabajo de tesis doctoral, para la optimización de los recursos de energía.

Por otra parte, cabe resaltar que actualmente el Grupo de Comunicaciones Multimedia (COMM), participa en el proyecto de investigación “*Smart Sound Processing for the Digital Living*” (SSPressing), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad. El proyecto cuenta con la participación de investigadores de cinco universidades de España y tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de Monitorización Ambiental Inteligente de Sonido, para detectar y clasificar sonidos existentes en entornos urbanos, empleando redes de sensores y actuadores acústicos. A continuación, se resaltan las principales características y objetivos del proyecto

- **Generación de mapas de ruido**

Los mapas proporcionarán información sobre los niveles sonoros en la zona de despliegue de los sensores y permitirán evaluar la exposición al ruido de la población en dicha área.

- **Identificación de entornos sonoros**

A partir de los sonidos captados por los sensores acústicos, se podrá determinar el tipo de entorno sonoro existente en la zona. Específicamente, se realizará una distinción

entre: entornos sonoros diurnos o nocturnos, entornos de tráfico o de zona residencial, entre otros.

- **Clasificación de los sonidos**

Esta característica permitirá clasificar los distintos tipos de sonidos o ruidos captados, a partir de lo cual, se podrá identificar el desarrollo de concentraciones, eventos, actividad en zonas de ocio nocturno, macro conciertos, población de aves, tipos de vehículos que generar el ruido de tráfico, etc.

- **Localización de fuentes de ruido y generación de alarmas**

Finalmente, a través de la red acústica desplegada, será posible determinar la procedencia de ruidos sobre un área monitorizada, lo que a su vez permitirá generar alarmas correspondientes en el caso en que se detecten determinado tipo de eventos sonoros.

Con respecto a las tareas que se están llevando a cabo en el grupo de investigación (COMM), estas se enfocan en la implementación de nodos empleando plataformas de desarrollo de bajo coste, para el despliegue de una red ad hoc que provea de conectividad al sistema de monitorización sonora (red acústica). Además, se está desarrollando un sistema de gestión a través de una aplicación *web*, la misma que permite analizar la operación de la red, así como almacenar los resultados de las mediciones. Para el desarrollo de los experimentos de campo, está previsto el despliegue de la red acústica en zonas urbanas de la ciudad de Valencia. En la Figura 5.14, se presentan imágenes acerca de los componentes del nodo ad hoc prototipo implementado para la red acústica, así como una captura de la interfaz *web* de gestión.

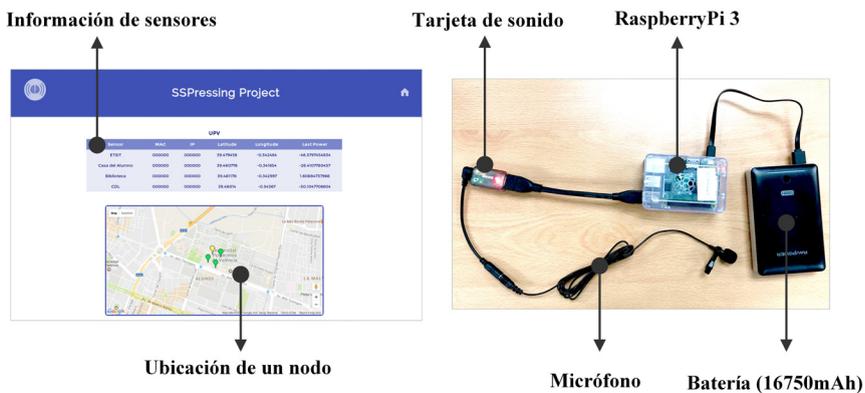


Figura 5.14 Interfaz *web* y componentes del nodo ad hoc prototipo para la red de sensores acústica del proyecto SSPressing

5.4. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado casos de estudios para la aplicación de redes ad hoc en entornos reales de operación. En primera instancia, se realizó el estudio de una topología lineal de longitud variable como red de conectividad para la implementación de un sistema de vídeo portero aplicado a edificios. Los resultados de los experimentos describen la característica inherente de una red ad hoc con respecto a la degradación del *throughput* conforme se incrementa el número de nodos en el escenario. En particular, para el caso del escenario lineal de seis saltos (estándar IEEE802.11g@54Mbps), desplegado en un edificio tipo, se obtuvo un *throughput* máximo aproximado de 2Mbps empleando tráfico *CBR*. No obstante, los experimentos desarrollados empleando flujos de audio-vídeo, describen una restricción adicional, en especial debido a la característica de variabilidad en el perfil del tráfico del vídeo. Dicho comportamiento, ocasiona la generación de ráfagas instantáneas con una demanda que puede superar el *throughput* disponible en el escenario. En tal sentido, a partir de una evaluación subjetiva del vídeo capturado en el dispositivo receptor, se establece un valor promedio de 400kbps como límite recomendable para el flujo de tráfico en el sistema de vídeo portero propuesto.

Por otra parte, se realizó el diseño e implementación de una arquitectura de vídeo monitorización para entornos agrícolas, empleando plataformas de desarrollo de bajo coste. Los experimentos realizados describen la operación estable (carga de CPU, temperatura) del nodo prototipo durante la captura y transmisión de los datos adquiridos por los sensores de forma simultánea con el proceso de captura, codificación y transmisión del vídeo. Adicionalmente, se realizó una caracterización de la demanda de corriente en el nodo, conforme se incrementa las capacidades (número de periféricos). A partir de los resultados se establece una autonomía de operación aproximada de 14.5 horas para el prototipo.

Finalmente, cabe resaltar la experiencia adquirida en el trabajo de tesis doctoral, para la evaluación y análisis de una red ad hoc, tanto en un entorno de simulación, así como mediante *testbed*, lo que ha motivado el desarrollo de las propuestas y estudios de aplicación descritos en el presente capítulo.

Referencias

- [1] ETSI Standard, ETSI ITS G5 - Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band, vol. 0, pp. 1-24, 2012.
- [2] IEEE Standard, IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7428792>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [3] DRIVE C2X Consortium, “DRIVE C2X - Accelerate cooperative mobility”. [Online]. Available: <http://www.drive-c2x.eu/project>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [4] FOTsis Consortium, “European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation”. [Online]. Available: <http://www.fotsis.com/>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [5] Department of Transportation, “Connected Vehicle Safety Pilot”. [Online]. Available: http://www.its.dot.gov/research_archives/safety/cv_safetypilot.htm. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [6] BRIC, “Urbizone wifi.brussels”. [Online]. Available: <http://bric.brussels/en/our-solutions/irisnet-1/wifi-brussels>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [7] Wireless Leiden Foundation, “Stichting Wireless Leiden”. [Online]. Available: <http://www.wirelessleiden.nl/en>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [8] V. Miemis, “Projects & Initiatives Building Ad-Hoc Wireless Mesh Networks”. [Online]. Available: <https://emergentbydesign.com/2011/02/11/16-projects-initiatives-building-ad-hoc-wireless-mesh-networks/>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [9] Aqeel-Ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture”, *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, 2014.
- [10] A. Nadeem, M. A. Hussain, O. Owais, A. Salam, S. Iqbal, and K. Ahsan, “Application specific study, analysis and classification of body area wireless sensor network applications”, *Comput. Networks*, vol. 83, pp. 363–380, 2015.
- [11] P. Pirozmand, G. Wu, B. Jedari, and F. Xia, “Human mobility in opportunistic networks: Characteristics, models and prediction methods”, *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 42, pp. 45–58, 2014.
- [12] B. Rashid and M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey”, *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 60, pp. 192–219, 2016.
- [13] D. G. Reina, S. L. Torral, F. Barrero, N. Bessis, and E. Asimakopoulou, “The Role of Ad Hoc Networks in the Internet of Things: A Case Scenario for Smart Environments”, in *Internet of Things and Inter-cooperative Computational Technologies for Collective Intelligence*, pp.89-113, 2013.
- [14] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey”, *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [15] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, “Survey of Important Issues in UAV Communication Networks”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2016.
- [16] J. Polo, G. Hornero, C. Duijneveld, A. García, and O. Casas, “Design of a low-cost Wireless Sensor Network with UAV mobile node for agricultural applications”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 119, pp. 19–32, 2015.
- [17] R. Grodi and D. B. Rawat, “UAV-assisted broadband network for emergency and public safety communications”, *IEEE Glob. Conf. Signal Inf. Process*, pp. 10–14, 2015.
- [18] P. Bupe, R. Haddad, and F. Rios-Gutierrez, “Relief and Emergency Communication Network Based on an Autonomous Decentralized UAV Clustering Network”, *Southeastcon, Proc. IEEE*, p. 8, 2015.

- [19] IETF MANET W.G, “Mobile Ad-hoc Networks (manet)”. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/wg/manet/charter/>. [Accessed: 21- Oct-2016].
- [20] N. Ahmad and S. Z. Hussain, “Broadcast Expenses Controlling Techniques in Mobile Ad-hoc Networks: A Survey”, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 248–261, 2015.
- [21] D. G. Reina, S. L. Toral, P. Johnson, and F. Barrero, “A survey on probabilistic broadcast schemes for wireless ad hoc networks”, *Ad Hoc Networks*, vol. 25, no. PA, pp. 263–292, 2015.
- [22] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti, “Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks”, *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA)*, 2000.
- [23] J. Xie, R. R. Talpade, A. Mcauley, and M. Liu, “AMRoute: Ad Hoc Multicast Routing Protocol”, *Mob. Netw. Appl.*, vol. 7, no. 6, pp. 429–439, 2002.
- [24] Y. Yi, J. Kong, M. Gerla, and J. S. Park, “CORA: Collaborative Opportunistic Recovery Algorithm for loss controlled, delay bounded ad hoc multicast”, *Comput. Commun.*, vol. 31, no. 15, pp. 3672–3682, 2008.
- [25] S. Lee, M. Gerla, C. Chiang, and A. M. Roite, “On-Demand Multicast Routing Protocol”, *Darpa Proj.*, pp. 298–302, 1999.
- [26] D. Promkotwong and O. Sornil, “A mesh-based QoS aware multicast routing protocol”, *Proc. - SNPD 2007 Eighth ACIS Int. Conf. Softw. Eng. Artif. Intell. Networking, Parallel/Distributed Comput.*, vol. 3, pp. 1046–1051, 2007.
- [27] M. Transier, H. Füller, J. Widmer, M. Mauve, and W. Effelsberg, “Scalable Position-Based Multicast for Mobile Ad-hoc Networks”, in *International Workshop on Broadband Wireless Multimedia: Algorithms, Architectures and Applications (BROADWIM)*, 2004.
- [28] X. Xiaojing, W. Xin, and Z. Xehua, “An efficient geographic multicast protocol for mobile ad hoc networks”, in *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM’06)*, 2006.
- [29] IETF MANET W.G, RFC 3626-Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. [Accessed: 21- Oct-2016], 2003.
- [30] IETF MANET W.G, RFC 7181-The Optimized Link State Routing Protocol Version 2. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181>. [Accessed: 21- Oct-2016], 2014.
- [31] A. Boukerche, B. Turgut, N. Aydin, M. Z. Ahmad, L. Bölöni, and D. Turgut, “Routing protocols in ad hoc networks: A survey”, *Comput. Networks*, vol. 55, no. 13, pp. 3032–3080, 2011.
- [32] IETF MANET W.G, RFC 3561-Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>. [Accessed: 21- Oct-2016], 2003.
- [33] IETF MANET W.G, Ad Hoc On-demand Distance Vector Version 2 (AODVv2) Routing-draft-ietf-manet-aodvv2-16. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-manet-aodvv2/>. [Accessed: 21- Oct-2016], 2016.
- [34] P. Arce, J. C. Guerri, A. Pajares, and O. Lázaro, “Performance evaluation of video streaming over ad hoc networks using flat and hierarchical routing protocols”, *Mob. Networks Appl.*, vol. 13, no. 3, pp. 324–336, 2008.
- [35] P. Arce, “Hierarchical routing and cross-layer mechanisms for improving video streaming quality of service over mobile wireless ad hoc networks”, *Universitat Politècnica de València*, 2014.
- [36] W. Castellanos, “Quality of Service Routing and Mechanisms for Improving Video Streaming over Mobile Wireless Ad hoc Networks”, *Universitat Politècnica de València*, 2015.
- [37] P. Simoens, F. A. Ali, B. Vankeirsbilck, L. Deboosere, F. De Turck, B. Dhoedt, P. Demeester, R. Torrea-Duran, L. Van Der Perre, and A. Dejonghe, “Cross-layer reduction of wireless network card idle time to optimize energy consumption of pull thin client protocols”, *J. Commun. Networks*, vol. 14, no. 1, pp. 75–90, 2012.
- [38] A. Garcia-Saavedra, P. Serrano, A. Banchs, and M. Hollick, “Balancing energy efficiency and throughput fairness in IEEE 802.11 WLANs”, *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 8, no. 5, pp. 631–645, 2012.
- [39] Lady Ada, Introducing the Raspberry Pi 2 - Model B. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introducing-the-raspberry-pi-model-b-plus-plus-differences-vs-model-b.pdf>. [Accessed: 29- Nov-2016].
- [40] Alfa Networks, Technical Specifications Awus036nh USB WLAN adapter. [Online]. Available: <http://www.rokland.com/support/specs/AWUS036NH.pdf>. [Accessed: 29- Nov-2016].

-
- [41] K. Townsend, Adafruit Ultimate GPS on the Raspberry Pi. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ultimate-gps-on-the-raspberry-pi.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [42] Lady Ada, Adafruit BME280 Humidity + Barometric Pressure + Temperature Sensor Breakout. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [43] IEEE Standard, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2012.
- [44] Cisco Systems, Technical Specifications Aironet PCI WLAN Adapter. [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-802-11a-b-g-pci-wireless-lan-client-adapter-pi21ag/product_data_sheet09186a00801ebc33.pdf. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [45] Cisco Systems, Technical Specifications AE1200 USB WLAN Adapter. [Online]. Available: http://downloads.linksys.com/downloads/userguide/AE1200-AE2500_UG-final-1.pdf. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [46] Dell, Technical Specifications 1450 USB WLAN Adapter. [Online]. Available: https://www.dell.com/downloads/us/products/optix/dell1450_spec.pdf [Accessed: 29-Nov-2016].
- [47] Dell, Technical Specifications 1350-1450 miniPCI WLAN Adapters, vol. 1350. [Online]. Available: http://www.dell.com/downloads/us/products/latit/dell_wireless_1350_1450.pdf. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [48] D-Link, Technocal Specifications DWA510 PCI WLAN Adapter. [Online]. Available: http://files.dlink.com.au/Products/DWA-510/Datasheet/DWA-510_datasheet_02.pdf. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [49] Hewlett-Packard, User Manual HN210W USB adapter. [Online]. Available: <http://www.hp.com/ctg/Manual/bpe50043.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [50] Intel, Technical Specifications 7260 PCIe WLAN Adapter. [Online]. Available: <https://cdn.cnetcontent.com/b3/19/b3197af2-01bd-4044-a47d-045121cf4e8c.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [51] Intel, Technical Specifications 3945 PCIe WLAN Adapter. [Online]. Available: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/product-briefs/pro-wireless-3945abg-network-connection-brief.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [52] M. Fotino and F. De Rango, “Energy Issues and Energy aware Routing in Wireless Ad-hoc Networks”, in *Mobile Ad-Hoc Networks: Protocol Design*, InTech, p. 84, 2011.
- [53] P. Basu and J. Redi, “Effect of overhearing transmissions on energy efficiency in dense sensor networks”, in *Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 206-214, 2004.
- [54] T. Xiong, J. Yao, J. Zhang, and W. Lou, “It can drain out your energy: An energy-saving mechanism against packet overhearing in high traffic wireless LANs”, *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. PP, no. 99, 2016.
- [55] T. Xiong, J. Zhang, and W. Lou, “On eliminating energy inefficiency of the packet overhearing problem in high traffic wireless LANs”, in *11th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking*, pp. 167–169, 2014.
- [56] C. Aydogdu, S. Member, and E. Karasan, “An Analysis of IEEE 802 . 11 DCF and Its Application to Energy-Efficient Relaying in Multi-Hop Wireless Networks”, *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 10, no. 10, pp. 1–14, 2010.
- [57] NS3 Project, ns-3 Tutorial. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.25/tutorial/ns-3-tutorial.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [58] NS3 Project, “All Traces, Doxygen”. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/docs/release/3.25/doxygen/_trace_source_list.html. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [59] Trace Website, “Yuv Sequences”. [Online]. Available: <http://trace.eas.asu.edu/yuv/>. [Accessed: 14-Feb-2017].
- [60] Xiph.org, “Xiph.org Video Test Media”. [Online]. Available: <https://media.xiph.org/video/derf/>. [Accessed: 14-Feb-2017].
- [61] I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*, 2nd ed. Wiley, 2010.
- [62] FFmpeg.org, “FFmpeg Project”, Documentation. [Online]. Available: <https://ffmpeg.org/documentation.html>. [Accessed: 14-Feb-2017].

- [63] H. Wu, S. Nabar, and R. Poovendran, "An Energy Framework for the Network Simulator 3 (ns-3)", in Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, vol. 3, pp. 222–230, 2011.
- [64] J. Eun-Sun and N. H. Vaidya, "An energy efficient MAC protocol for wireless LANs", in Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol. 3, no. c, pp. 1756–1764, 2002.
- [65] S. Gonzalez, P. Arce, and J. C. Guerri, "Buffering Technique for Optimizing Energy Consumption in the Transmission of Multimedia Traffic in Ad-Hoc Networks", *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 1, pp. 250–258, 2015.
- [66] P. Swain, S. Chakraborty, S. Nandi, and P. Bhaduri, "Performance modeling and evaluation of IEEE 802.11 IBSS power save mode", *Ad Hoc Networks*, vol. 13, pp. 336–350, 2014.
- [67] V. Vukadinovic, I. Glaropoulos, and S. Mangold, "Enhanced power saving mode for low-latency communication in multi-hop 802.11 networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 23, pp. 18–33, 2014.
- [68] A. Belghith and W. Akkari, "Performance evaluation of power save protocols using carrier sensing in multihop ad hoc networks", in *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, no. 3, pp. 616–623, 2009.
- [69] S. S. Wang, C. C. Li, H. W. Lin, and K. P. Shih, "A passive self-configuration MAC protocol for supporting network management in IEEE 802.11-based multi-hop mobile ad hoc networks", *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 56, pp. 149–157, 2015.
- [70] D. Ngoc, M. Dang, M. Van Nguyen, C. S. Hong, S. Lee, and K. Chung, "An Energy Efficient Multi-channel MAC Protocol for Wireless Ad hoc Networks", vol. 13, no. 10, pp. 451–456, 2012.
- [71] Y. Shi, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Ad Hoc Networks", *Wirel. Sens. Netw.*, vol. 1, no. 5, pp. 407–416, 2009.
- [72] A. O. Ifedayo and M. Dlodlo, "Variable transmission power control in Wireless Ad-Hoc Networks", in *IEEE AFRICON Conference*, 2015.
- [73] P. Ramachandran and M. Dinakaran, "Signal Strength and Residual Power Based Optimum Transmission Power Routing for Mobile Ad hoc Networks", in *Procedia Computer Science*, vol. 92, pp. 168–174, 2016.
- [74] D. Ngoc and M. Dang, "A SINR-based Transmission Power Control for MAC Protocol in Wireless Ad hoc Networks", in *Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, pp. 103–107, 2012.
- [75] Z. Shunli, Y. I. N. Xunhe, W. E. I. Xueye, and W. Jun, "An Improved Maximum Uniform SIR Power Control in Ad Hoc Networks", pp. 5454–5459, 2012.
- [76] A. Sarfaraz Ahmed, T. Senthil Kumaran, S. Syed Abdul Syed, and S. Subburam, "Cross-Layer Design Approach for Power Control in Mobile Ad Hoc Networks", *Egypt. Informatics J.*, pp. 1–7, 2014.
- [77] A. Arivoli and P. Narayanasamy, "Cross-layer Design of a LOADPOWER Control Protocol - PWmin and PWmax Transmission Power Assignment Algorithm in Wireless Ad hoc Networks", pp. 1577–1582, 2014.
- [78] C. K. Toh, "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, no. 6, pp. 138–147, 2001.
- [79] D. Kim, K. Obraczka, J. Garcia-Luna-Aceves, J. C. Cano, and P. Manzoni, "Power-Aware Routing Based on The Energy Drain Rate for Mobile Ad Hoc Networks", in *Computer Communications and Networks*, Proceedings. Eleventh International Conference on, pp. 565–569, 2002.
- [80] F. De Rango and M. Fotino, "Adaptive tuning in minimum drain rate algorithm for routing protocols in MANETs", in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, pp. 1584–1589, 2010.
- [81] J. Vazifehdan, R. V. Prasad, and I. Niemegeers, "Minimum Energy Cost Reliable Routing in Ad Hoc Wireless Networks", in *The 8th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 781–786, 2011.
- [82] D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. M. A., "High Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing", in *In MobiCom*, vol. 3, 2003.
- [83] F. De Rango and F. Guerriero, "Link-Stability and Energy Aware Routing Protocol in Distributed Wireless Networks", *IEEE Trans. PARALLEL Distrib. Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 713–726, 2012.
- [84] L. Kaddar, Y. Hadjadj-Aoul, and A. Mehaoua, "EVAN: Energy-Aware SVC Video Streaming over Wireless Ad Hoc Networks", in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, 2011.

- [85] L. Kaddar and A. Mehaqua, "ESTREL: Transmission and Reception Energy Saving Model for Wireless Ad Hoc Networks", in *Local Computer Networks*, 32nd IEEE Conference on, pp. 539–547, 2007.
- [86] H. Schwarz, D. Marpe, and T. Wiegand, "Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H. 264 / AVC Standard", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 17, no. 9, pp. 1103–1120, 2007.
- [87] S. González, W. Castellanos, P. Guzmán, P. Arce, and J. C. Guerri, "Simulation and Experimental Testbed for Adaptive Video Streaming in Ad hoc Networks", *Ad Hoc Networks - (ELSEVIER)-Scopus Q1 - Press*, vol. 52, pp. 89–105, 2016.
- [88] M. C. and S. Giordano, "Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 1, pp. 85–96, 2014.
- [89] T. Qiu, N. Chen, K. Li, D. Qiao, and Z. Fu, "Heterogeneous ad hoc networks: Architectures, advances and challenges", *Ad Hoc Networks*, vol. 0, pp. 1–10, 2016.
- [90] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [91] A. S. M. Zahid Kausar, A. W. Reza, M. U. Saleh, and H. Ramiah, "Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 973–989, 2014.
- [92] Wardi, K. Hirata, Y. Higami, and S. Y. Kobayashi, "Residual energy-based OLSR in mobile ad hoc networks", *Int. Conf. Multimed. Technol. ICMT 2011*, pp. 3214–3217, 2011.
- [93] Fatima Lakrami & Najib Elkamoun, "Energy and mobility in OLSR Routing Protocol", *Int. J. Comput. Networking, Wirel. Mob. Commun.*, vol. 2, no. 4, pp. 17–26, 2012.
- [94] S. Mahfoudh and P. Minet, "An Energy Efficient Routing Based on OLSR in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks", 22nd Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. - Work, pp. 1253–1259, 2008.
- [95] K. A. Adoni and R. D. Joshi, "Optimization of Energy Consumption for OLSR Routing Protocol in MANET", vol. 4, no. 1, pp. 251–262, 2012.
- [96] F. De Rango, M. Fotino, and S. Marano, "EE-OLSR: Energy Efficient OLSR routing protocol for Mobile ad-hoc Networks", in *Military Communications Conference MILCOM IEEE*, 2008.
- [97] F. De Rango and M. Fotino, "Energy efficient OLSR performance evaluation under energy aware metrics", *Proc. 12th Int. Conf. Symp. Perform. Eval. Comput. Telecommun. Syst.*, pp. 193–198, 2009.
- [98] T. Kunz, "Energy-Efficient Variations of OLSR", in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference IWCMC*, pp. 517–522, 2008.
- [99] Telecommunication Networks Group TKN, "EvalVid Framework", [Online]. Available: <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/>. [Accessed: 28-Dec-2016].
- [100] H. Q. Zhai and Y. G. Fang, "Distributed flow control and medium access in multihop ad hoc networks", *Ieee Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, no. 11, pp. 1503–1514, 2006.
- [101] E. Weing, H. Lehn, and K. Wehrle, "A performance comparison of recent network simulators", in *ICC'09 Proceedings of the IEEE international conference on Communications*, pp. 1287–1291, 2009.
- [102] M. A. Rahman, A. Pakštas, and F. Z. Wang, "Network modelling and simulation tools", *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 17, no. 6, pp. 1011–1031, 2009.
- [103] C. Vallati, V. Omwando, and P. Mohapatra, "Experimental Work Versus Simulation in the Study of Mobile Ad hoc Networks", in *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, Second Edi., pp. 191–238, 2013.
- [104] T. Treece, Node.js Embedded Development on the Raspberry Pi. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/node-embedded-development.pdf>. [Accessed: 23- Jan-2017].
- [105] E. Nordström, P. Gunningberg, and H. Lundgren, "A Testbed and Methodology for Experimental Evaluation of Wireless Mobile Ad hoc Networks", in *Proceedings of the International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, pp. 100–109, 2005.
- [106] J. Yi, A. Adnane, S. David, and B. Parrein, "Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 1, pp. 28–47, 2011.
- [107] J. Toutouh and E. Alba, "Light commodity devices for building vehicular ad hoc networks: An experimental study", *Ad Hoc Networks*, vol. 37, pp. 499–511, 2016.
- [108] G. Anastasi, E. Borgia, M. Conti, E. Gregori, and A. Passarella, "Understanding the real behavior of Mote and 802.11 ad hoc networks: An experimental approach", *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 1, no. 2, pp. 237–256, 2005.
- [109] D. Johnson, T. Stack, R. Fish, D. M. Flickinger, L. Stoller, R. Ricci, and J. Lepreau, "Mobile Emulab:

- A Robotic Wireless and Sensor Network Testbed”, in Proceedings of the 25th Conference on Computer Communications, 2006.
- [110] D. Wu, D. Gupta, and P. Mohapatra, “QuRiNet: A wide-area wireless mesh testbed for research and experimental evaluations”, *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 7, pp. 1221–1237, 2011.
- [111] H. Soroush, N. Banerjee, A. Balasubramanian, M. D. Corner, B. N. Levine, and B. Lynn, “DOME: a diverse outdoor mobile testbed”, in Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Hot Topics of Planet-Scale Mobility Measurements, pp. 1–6, 2009.
- [112] A. Rice and S. Hay, “Measuring mobile phone energy consumption for 802.11 wireless networking”, *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 6, no. 6, pp. 593–606, 2010.
- [113] L. Feeney and M. Nilsson, “Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment”, in Conference of the IEEE Computer and Communications Societies., pp. 1557, 1548, 2001.
- [114] S. Keranidis, G. Kazdaridis, V. Passas, T. Korakis, I. Koutsopoulos, and L. Tassioulas, “Online energy consumption monitoring of wireless testbed infrastructure through the NITOS EMF framework”, 8th ACM Int. Work. Wirel. Netw. Testbeds, Exp. Eval. Charact., pp. 73–80, 2013.
- [115] M. Maksimovic and V. Vujovic, “Raspberry Pi as a Sensor Web node for home automation”, *Ad Hoc Networks*, vol. 44, pp. 153–171, 2015.
- [116] S. Ferdoush and X. Li, “Wireless Sensor Network System Design using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications”, in International Conference on Future Networks and Communications, vol. 34, pp. 103–110, 2014.
- [117] Olsr.org Projects, “OLSR daemon”, Releases. [Online]. Available: <http://www.olsr.org/mediawiki/index.php/Releases>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [118] Lady Ada, Adafruit INA219 Current Sensor Breakout. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ina219-current-sensor-breakout.pdf>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [119] Adafruit Industries, “Adafruit INA219”, INA219 Current Sensor. [Online]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_INA219. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [120] Iperf.fr, “iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP”. [Online]. Available: <https://iperf.fr/>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [121] Tcpdump.org, “Tcpdump & LibPcap”. [Online]. Available: <http://www.tcpdump.org/>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [122] Frenchfries.net, “Tcpstat”. [Online]. Available: <http://www.frenchfries.net/paul/tcpstat/>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [123] Nodejs.org, “Node.js”. [Online]. Available: <https://nodejs.org/es/>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [124] Socket.io, “socket.io”, Using with Node http server. [Online]. Available: <http://socket.io/docs/#>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [125] I. Buchmann, “Testing and Monitoring”, in Batteries in Portable World, Third Edit., C. I. Electronics, Ed. 2011.
- [126] Intel Corporation, National Semiconductor Corporation, Toshiba Battery Co., Duracell Inc, and Energizer Power Systems, Smart Battery Data Specification. 1998.
- [127] S. K. Sarkar, T. G. Basavaraju, and C. Puttamadappa, “Energy Management Systems in Ad Hoc Wireless Networks”, in Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols, and Applications, Second Edi., pp. 207–226, 2013.
- [128] NXP Semiconductors, UM10204 I²C-bus specification and user manual. [Online]. Available: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [129] Texas Instruments, High-or Low-Side Measurement , Bi-Directional Current / Power Monitor with I²C™ Interface. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ina219.pdf>. [Accessed: 23-Jan-2017].
- [130] Multimedia Communications Group (COMM)-ITEAM-UPV, “Open Source”. [Online]. Available: <https://www.comm.upv.es/en/open-source/>.
- [131] Union Internacional de Telecomunicaciones, Recomendación UIT-T G.114 Tiempo de transmisión en un sentido, 2003.
- [132] John Johnston, S. Farrington, and Roland Saville, “Cisco Systems: Medianet Reference Guide”, 2010.
- [133] Adafruits Industries, “Repositories”. [Online]. Available: <https://github.com/adafruit>. [Accessed: 15-Feb-2017].

- [134] Internet-Draft, HTTP Live Streaming draft-pantos-http-live-streaming-20. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/pdf/draft-pantos-http-live-streaming-20.pdf>. [Accessed: 15-Feb-2017].
- [135] Raspberrypi.org, “Raspberry Pi Hardware”. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/README.md>. [Accessed: 15-Feb-2017].

Apéndice A. Listado de Publicaciones

A continuación, se presenta el listado de publicaciones desarrolladas a partir del trabajo de tesis doctoral.

Artículos en Revistas

1. S. González, P. Arce, and J. C. Guerri, “Técnica de buffering para la optimización del consumo de energía en la transmisión de tráfico multimedia en redes ad-hoc,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 250-258, 2015.
2. S. González, W. Castellanos, P. Guzmán, P. Arce, and J. C. Guerri, “Simulation and Experimental Testbed for adaptive video streaming in ad hoc networks,” in *Ad Hoc networks*, vol. 52, pp.89-105, 2016.

Capítulos de Libros

1. P. Arce, S. González, and J. C. Guerri, “Altruistic Networks: where every node matters,” *Recent Advances in Ad Hoc Networks Research*, Ed. Nova Science Publishers, pp. 41-68, 2014.

Artículos en Conferencias

1. S. González, P. Arce, and J. C. Guerri “Nodos estratégicos: una propuesta para mejorar la eficiencia energética en redes inalámbricas Ad-Hoc,” in *Proc. of the Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Valencia (Spain), Sep. 2014, article no. 203.
2. P. Arce, I. de Fez, F. Fraile, S. González, P. Guzmán, and J. C. Guerri “QoE en redes adhoc, descarga adaptativa de contenidos y vídeo 3D,” in *Proc. of Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL)*, Palma de Mallorca (Spain), Oct. 2015, pp. 339-346.
3. S. González, P. Arce, and J. C. Guerri, “Simulation and testbed evaluation for optimizing energy consumption in ad hoc networks based on OLSR protocol,” in *Proc. of the International Joint Conference on e-Business and*

- Telecommunications (ICETE), Conference on Wireless Networks and Mobile Systems (WINSYS), Lisbon (Portugal), Jul. 2016, pp. 129-136.
4. S. González, T. R. Vargas, P. Arce, and J. C. Guerri, “Energy optimization for video monitoring system in agricultural areas using single board computer nodes and wireless ad hoc networks,” presented at Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA), Bucaramanga (Colombia), Aug. 2016.
 5. S. González, P. Arce, and J. C. Guerri, “Implementación de un banco de pruebas para redes inalámbricas ad hoc empleando plataformas Rasperry Pi y Node.js,” in Proc. of the Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Madrid (Spain), Sep. 2016, article S3.2.2.

Adicionalmente durante la elaboración de la tesis el autor ha participado en los siguientes proyectos.

- Desarrollo y Evaluación de un Prototipo con Tecnología Ad Hoc para Sistemas de Video Porteros (2015-2016). Contrato entre la empresa Fermax y el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM)-UPV.
- Aplicación de Redes Ad Hoc para el Diseño de un Sistema de Monitorización y Mejora de Procesos en un Entorno Agrícola (2015-actualidad). Red Temática RiegoNets-CYTED (514RT0486).
- Smart Sound Processing for the Digital Living (2016-actualidad). Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad (TEC2015-67387-C4-1-R).

Apéndice B. Detalles de Implementación

B.1 Configuración del Modo Ad Hoc e Instalación de OLSR en las Raspberry Pi

La configuración en modo ad hoc de la tarjeta inalámbrica se realiza mediante la edición de los archivos *interfaces* y *wpa_supplicant.conf*, disponibles en el *kernel* Linux del sistema operativo *Rasbian*. A continuación, se presenta un ejemplo de la configuración realizada sobre uno de los dispositivos (nodo 1).

En primera instancia para las tareas de desarrollo y configuración es habitual acceder de forma remota a la Raspberry Pi, la conexión se realiza vía SSH (*Secure Shell*) desde la terminal de comandos (CLI) en un ordenador.

```
ssh -l pi DirecciónIP
```

En el archivo *interfaces* se definen los parámetros de la red tal como: la interfaz a configurar (*wlan0*), el modo de asignación de direcciones (en este caso estático), los parámetros de direccionamiento (dirección IP, máscara de red, *broadcast*), el canal, un identificador SSID (*Service Set Identifier*) y se especifica el modo de operación ad hoc para la interfaz.

```
Archivo: interfaces  
Ubicación: /etc/network/  
Parámetros de configuración:  
auto lo  
iface lo inet loopback  
iface eth0 inet dhcp  
auto wlan0  
iface wlan0 inet manual  
wpa-conf /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf  
iface wlan0 inet static  
    address 10.0.0.11  
    netmask 255.255.255.0  
    broadcast 10.0.0.255  
    wireless-channel 9  
    wireless-essid NetRPi  
    wireless-mode ad-hoc
```

El modo ad hoc, así como el identificador de red pueden ser especificados adicionalmente en el archivo *wpa_supplicant.conf*.

```
Archivo: wpa_supplicant.conf
Ubicación: /etc/wpa_supplicant/
Parámetros de configuración:
ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1
ap_scan=2
network={
ssid="NetRPi"
mode=1
key_mgmt=NONE
}
```

Con respecto al protocolo de enrutamiento OLSR, la implementación desarrollada por el proyecto *OLSR.org* se encuentra disponible en [117]. El procedimiento de descarga e instalación (en *Raspbian*) desde la interfaz de línea de comandos (CLI) se describe a continuación.

Descarga del *routing daemon olsrd*

```
wget: http://www.olsr.org/releases/0.9/olsrd-x.x.x.x.tar.bz2
```

Instalación

```
tar - xzvf olsrd-x.x.x.x.tar.bz2 # Descomprime el paquete
cd olsrd-x.x.x.x # Acceso a la carpeta
sudo make # Compilación e instalación del protocolo
sudo make install
```

Como resultado del proceso se genera un archivo de configuración en la ubicación */etc/olsrd/olsr.conf*. Este archivo se puede editar y contiene los parámetros característicos para la operación del protocolo como por ejemplo los intervalos de envío y el tiempo de validez de los mensajes de *routing*. Para ejecutar el protocolo desde la interfaz de línea de comandos se emplea el siguiente comando.

```
sudo olsrd -i wlan0
```

Adicionalmente se requiere activar el *plugin txtinfo* para monitorizar la operación del protocolo.

```
cd olsrd-x.x.x.x/lib/txtinfo # Ubicación del plugin txtinfo
sudo make # Compilación e Instalación del plugin txtinfo
sudo make install
```

Para ejecutar el *plugin* se emplea el comando.

```
echo /all | nc localhost 2006
```

Finalmente para la operación automática del protocolo en el nodo ad hoc, los comandos indicados pueden ser incluidos en el archivo */etc/rc.local*, que permite ejecutar un conjunto de instrucciones durante el arranque de un dispositivo con el sistema operativo *Linux*.

B.2 Sincronización de los Nodos Ad Hoc

A diferencia de un ordenador convencional, la plataforma Raspberry Pi no incluye un reloj de tiempo real. En tal sentido, para la sincronización de los nodos ad hoc se configuró un cliente NTP (*Network Time Protocol*) en cada dispositivo y adicionalmente se activó la opción de servidor en un ordenador portátil. Para instalar el protocolo NTP se emplea el siguiente comando a través de la terminal (CLI), para éste procedimiento se requiere acceso a Internet para la plataforma (RPi).

```
sudo apt-get install ntpdate # Instala el protocolo NTP sobre la plataforma
```

Como resultado se genera el archivo de configuración */etc/ntp.conf*, la edición de éste archivo permite activar la funcionalidad de cliente y/o servidor NTP. En el lado del servidor se incluye la dirección de difusión de la red (esta configuración se realiza sobre el ordenador portátil). En cuanto al cliente NTP, se indica la dirección IP del dispositivo que actúa como servidor y se especifica la opción de modo cliente. De ésta forma durante el arranque de un nodo la adquisición de la hora se realiza a través del ordenador que actúa como servidor.

```
#Servidor NTP
broadcast 10.0.0.255 # Dirección broadcast de la red
#Cliente NTP
server 10.0.0.100 prefer # Dirección IP del servidor
disable auth # Se deshabilita procesos de autenticación
Broadcastclient # Se especifica la funcionalidad de cliente NTP
```

B.3 Captura y Cómputo del Consumo de Energía en la Interfaz IEEE 802.11

Para el proceso de captura de las muestras de corriente y cómputo del consumo de energía se desarrolló un *script* en el lenguaje de programación *Python*. El código emplea la librería INA219 desarrollada por Adafruit [119] que permite solicitar al sensor la captura de una muestra de corriente a través del método *ina.getCurrent_mA()*, el *script* para el proceso de muestreo se presenta a continuación.

```
#!/usr/bin/python
import os
from Subfact_ina219 import INA219 # Librería desarrollada por Adafruit
import time
from time import sleep
from datetime import datetime, timedelta
ina = INA219()
batterycapacity=ic # Capacidad inicial de energía
ec=0.0 # Consumo inicial de energía
currentlist=[0.0] # Vector de muestras de corriente
indice=1 # Inicializa vector de muestras
interval=2 #Intervalo (s) para el cálculo del consumo de energía
flag=0 # Activación de un flag cuando se alcanza el 90% del consumo
samplingtime=st # Intervalo de muestreo en (s)
M=3600/st # Número muestras a capturar en una hora
sampling=1 # Flag de activación/desactivación para la captura de muestras
starttest = datetime.now()# Tiempo de inicio de un experimento
endtest = starttest + timedelta(minutes) # Duración del experimento
fc= open("/MeasuresNodoX/EnergyConsumption.txt", "w") # Escritura del consumo
fc.write(" %.3f " % ec) # de energía en un fichero
fc.close()
while (sampling == 1): # Muestreo y condición para modo ahorro de energía
    currentlist.append(ina.getCurrent_mA())
    if ec > 90.0 and flag==0:
        os.system('iwconfig wlan0 txpower off') # Desactiva tarjeta wifi
        flag=1
    if datetime.now() > starttest + timedelta(seconds=interval):
        ec=ec+(currentlist[indice]/M)*100/ic # Cálculo del consumo (%)
        fc= open("MeasuresNodoX/EnergyConsumption.txt", "w")
        fc.write(" %.3f " % ec) # Actualización del consumo
        fc.close()
        interval = interval+2 # Próximo intervalo de actualización
    if datetime.now() > endtest: # Escritura del conjunto de muestras
        fm= open("MeasuresNodoX/CurrentSamplesNodoX.txt", "w")
        for sample in currentlist:
            fm.write(str(sample))
            fm.write("\n")
        fm.close()
        sampling=0
        indice=indice+1
        sleep(st) # Intervalo de muestreo
os.system('halt') # Desactivación del nodo
```

Como se aprecia, el proceso de muestreo se realiza cada milisegundo y las medidas capturadas son indexadas en un vector. A partir de las muestras, se realiza el cómputo del consumo de energía en intervalos correspondientes a la frecuencia de envío de los mensajes *Hello* del protocolo OLSR (dos segundos). El valor de energía obtenido se almacena en un fichero. Dicha información es empleada por el mecanismo propuesto SOLSR para la inclusión de la métrica de energía en los paquetes *Hello*. La capacidad de energía inicial es definida sobre el *script*, lo que permite mantener un control sobre la duración de los experimentos. En tal sentido, cuando el cómputo del consumo de energía alcanza el 90% de la capacidad definida, la tarjeta es deshabilitada de forma automática mediante el comando Linux `iwconfig wlan0 txpower off`, emulando un estado de bajo consumo. A continuación, el vector de muestras capturadas se escribe en un fichero y finalmente el nodo es desactivado.

B.4 Configuración y Transmisión del Flujo Unidireccional de Audio - Vídeo

A continuación, se presentan los *scripts* Linux desarrollados para la configuración y transmisión del flujo unidireccional de audio – vídeo, para el estudio de viabilidad del sistema de vídeo portero inalámbrico empleando una red ad hoc *multi-hop*.

```
#!/bin/bash
PortTraffic=12346;
Hop=$1
bitrate=$2

# Script Nodo Transmisor (N1)
# Tcpdump --> Captura Paquetes Enviados por N1 (Flujo: Audio-Video)

tcpdump -v -tt -ni wlan0 -n ether src mac_addrN1 and dst port $PortTraffic -w
TxAV_${Hop}Hop_V${bitrate}A32K.pcap &

# Transmision Audio-Video

ffmpeg -thread_queue_size 1024 -f video4linux2 -i /dev/video1 -
thread_queue_size 1024 -f alsa -ac 2 -i hw:1 -vcodec libx264 -pix_fmt yuv420p -
b:v $bitrate -r 16 -g 16 -threads 4 -preset slow -tune zerolatency -acodec
libfdk_aac -ac 1 -b:a 32k -f mpegts udp://ip_addressN0:$PortTraffic

# Script: Nodo Rx (N0)
# Tcpdump --> Captura Paquetes Enviados por N1 (Flujo: Audio-Video)

tcpdump -v -tt -ni wlan0 -n ether src mac_addrN1 and dst port $PortTraffic -w
RxAV_${Hop}Hop_V${bitrate}A32K.pcap &

# Reproducción del Audio-Video

ffplay -probesize 50000 udp://ip_addressN1:$PortTraffic
```

Como se puede apreciar, para el estudio se empleó la herramienta FFmpeg [62]. En el nodo transmisor (nodo N1), se configuró la captura de los dispositivos de audio y vídeo (micrófono y cámara), para generar los archivos de entrada a la herramienta de codificación. Posteriormente se definen los *codecs*, específicamente se empleó la librería de libre distribución *libx264* para la codificación del vídeo en H.264 y el codec AAC (*Advanced Audio Coding*) para el audio, en concreto la librería *libfdk_aac*. En cuanto a los parámetros de codificación para el vídeo se definió 16 fps y un gop de 16, además se empleó un modo de codificación basado en *bitrate*, lo que permite mantener una estimación de la carga de tráfico en los experimentos. En cuanto al audio, se definió una tasa fija de 32kbps, así como un canal de salida. A continuación, los datos codificados se multiplexaron en un flujo TS (*Transport Stream*) para su transmisión en tiempo real empleado como protocolo de transporte UDP (*User Datagram Protocol*).

Por otra parte, se configuró la herramienta *ffplay* (parte del proyecto FFmpeg) para la reproducción del vídeo en el nodo receptor (nodo N0). Finalmente, tanto en el nodo transmisor como en el nodo receptor se configuró la herramienta *tcpdump* para la captura y análisis del tráfico.