

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA EN MALLA PARA EL
TRANSPORTE DE VOZ EN UN ENTORNO RURAL**



**JULIÁN ANDRÉS HURTADO MUÑOZ
DIANA CAROLINA LOZANO ORDÓÑEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2007**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA EN MALLA PARA EL
TRANSPORTE DE VOZ EN UN ENTORNO RURAL**



**JULIÁN ANDRÉS HURTADO MUÑOZ
DIANA CAROLINA LOZANO ORDÓÑEZ**

**Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones**

**Director
Esp. Guefry Agredo Méndez**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2007**

A mi familia que ha estado a mi lado en todos los momentos de mi vida brindandome amor, apoyo incondicional y creyendo en mi. En especial a mi Abuela Cecilia que dedicó mis primeros cinco años de vida a cuidarme, enseñarme y ayudarme a crecer, y a la que considero como otra mamá. A mi madre Analid, quien ha sido mi gran inspiración, compañera, amiga y gran ejemplo de vida. Gracias mami por tu inmenso amor, apoyo y dedicación. A mi papá Carlos, por darme la oportunidad de tener un papá verdadero con el que puedo contar, reír, llorar, gracias por su ayuda, cariño y comprensión. A mi hermanos Diana y Carlitos, quienes son una de mis grandes motivaciones para seguir adelante, gracias por su amor, consejos y por aguantarme.

A Dianita, con quien he compartido momentos maravillosos y que con el transcurso del tiempo pasó de ser una compañera a una gran amiga a la cual le tomé mucho cariño, confianza, respeto y aprecio. Gracias por tus enseñanzas, dedicación, empeño y sobre todo por tu gran amistad.

A todos mis amigos que han estado a mi lado...

Los quiero mucho, sin ustedes no lo habría logrado, GRACIAS, les dedico este triunfo con todo mi cariño.

Julián Andrés Hurtado Muñoz

La hermosa mujer que me dio la luz de la vida, me enseñó que con amor se pueden lograr cosas imposibles, mis dos hermanos con sus acciones me demostraron que siempre se puede ser más noble y mejor persona, de mi familia aprendí que los momentos adversos son pasajeros cuando estamos juntos.

Julián me contagio con su alegría y optimismo y me alentó cuando no tenía ganas de seguir, mientras mis amigos hicieron florecer mil sonrisas de mi alma y mi querido amor me acompañó firme y fiel hasta el fin de esta historia y más allá.

Este triunfo es de todos ellos, que me han brindado felicidad y apoyo durante todos los días de mi vida, por ser mi motor y el motivo para dar lo mejor de mi cada día y así poder sonreír junto a ellos cuando nuevamente conquiste otro sueño.

A todos muchas gracias

Diana Carolina Lozano Ordóñez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas aquellas personas que nos han acompañado en el recorrido de este Trabajo de Grado con sus consejos, apoyo y amistad. Con especial aprecio a:

A Dios, por ser el que nos guía y bendice diariamente, dándonos la sabiduría, el amor y la salud para culminar este gran sueño.

Ing. Esp. Guefry Ágredo Méndez, por su dedicación y apoyo constante, por ser más que un tutor un amigo que siempre estuvo dispuesto a colaborarnos y enseñarnos.

A todos los Ingenieros integrantes del GNTT, por estar siempre atentos a nuestras consultas y dudas.

Al grupo EHAS de la Universidad del Cauca, por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A cada uno de los profesores que orientó nuestra carrera, por las enseñanzas y consejos que nunca olvidaremos.

A nuestros inolvidables compañeros que con el paso de los años se convirtieron en amigos y hermanos con los cuales compartimos hermosos momentos.

A nuestras familias que con su amor y entrega infinita se convierten en el motivo de nuestro esfuerzo y la razón para conseguir este primer sueño y seguir luchando por conquistar nuevas metas.

A todos ustedes infinitas gracias y nuestros mejores deseos!!!

Diana y Julián

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
LISTA DE ANEXOS	v
LISTA DE ACRÓNIMOS	v
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN MALLA Y DE LA VOIP	3
1.1 GENERALIDADES DE REDES INALÁMBRICAS	3
1.1.1 Topologías de Red	4
1.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN MALLA.....	5
1.3 CONFIGURACIONES DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN MALLA.....	7
1.3.1 Configuración de Infraestructura ó <i>Backbone</i>	8
1.3.2 Configuración de Cliente WMN.....	9
1.3.3 Configuración Híbrida de las WMNs	10
1.4 TIPOS DE ARQUITECTURA DE LAS REDES EN MALLA.....	10
1.4.1 Modelo de Única Frecuencia	10
1.4.2 Modelo de Doble Frecuencia.....	11
1.4.3 Modelo de Múltiples Frecuencias y Múltiples Interfaces	12
1.5 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LAS REDES EN MALLA.....	12
1.5.1 Robustez	12
1.5.2 Ancho de Banda Superior	13
1.5.3 Capacidad para Volver a Emplear el Espacio	13
1.5.4 Escalabilidad.....	13
1.5.5 Facilidad de Integración y Simplicidad.....	13
1.5.6 Compatibilidad e Interoperabilidad con Redes Inalámbricas Existentes	14
1.5.7 Red de Múltiples Saltos	14
1.5.8 Consumo de Energía	14
1.6 DIFERENCIAS ENTRE LAS REDES <i>AD HOC</i> Y LAS REDES EN MALLA	14
1.6.1 Infraestructura ó <i>Backbone</i> Inalámbrico	14
1.6.2 Integración.....	14
1.6.3 Configuración y Enrutamiento Dedicado	15
1.6.4 Múltiples Interfaces	15
1.7 APLICACIONES	15
1.7.1 Redes Domésticas	15
1.7.2 Redes Residenciales.....	16
1.7.3 Sistema Médico y de Salud	16
1.7.4 Sistema de Seguridad y Vigilancia	16
1.7.5 Red de Sensores	16
1.7.6 Redes de Área Metropolitana	17
1.7.7 Automatización de Edificios.....	17
1.7.8 Redes Empresariales.....	18
1.7.9 Conexión a un Proveedor de Servicios de Internet (<i>Internet Service Provider, ISP</i>) a través de Banda Ancha.....	19
1.8 ALGORITMOS DE ENRUTAMIENTO.....	19
1.8.1 Generalidades.....	19
1.8.2 Clasificación de los Protocolos	19
1.8.3 Principales Algoritmos de Enrutamiento para Redes en Malla Fijas	20
1.9 VOZ SOBRE IP EN REDES INALÁMBRICAS EN MALLA.....	23
1.9.1 Introducción	23
1.9.2 Definición de VoIP	24
1.9.3 Estándares de Compresión de Voz	25
1.9.4 Tipos de Protocolos de VoIP.....	26
1.9.5 Encapsulamiento de una Trama de VoIP.....	28
1.9.6 Factores que Afectan la Calidad de Voz	28
1.9.7 Requisitos para el Envío de VoIP en una Red Inalámbrica en Malla.....	30
2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESTÁNDARES IEEE 802.15.4, 802.11 Y 802.16 EN SU MODO DE OPERACIÓN DE MALLA.....	32
2.1 ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.....	32

2.1.1	Componentes de una WPAN IEEE 802.15.4.....	33
2.1.2	Formación de una Topología de Malla.....	33
2.1.3	Redes en Malla IEEE 802.15.5.....	35
2.2	ESTÁNDAR IEEE 802.11.....	36
2.2.1	Componentes de la Arquitectura IEEE 802.11	38
2.2.2	Redes en Malla IEEE 802.11s	38
2.3	ESTÁNDAR IEEE 802.16-2004	51
2.3.1	Establecimiento de una Red Inalámbrica en Malla.....	52
3.	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS FIJAS EN CONFIGURACIÓN DE MALLA PARA ENTORNOS RURALES	56
3.1	DEFINICIÓN DEL ESCENARIO DE OPERACIÓN	56
3.2	CRITERIOS DE NEGOCIO	57
3.2.1	Visión General del Mercado.....	57
3.2.2	Implementaciones Actuales de las WMNs.....	57
3.3	CRITERIOS TECNOLÓGICOS.....	59
3.3.1	Nivel Físico	59
3.3.2	Nivel de Enlace de Datos	65
3.3.3	Nivel de Red	68
3.4	CRITERIOS DE DISEÑO	69
3.4.1	Configuración del Enlace	69
3.4.2	Levantamiento del Sitio.....	69
3.4.3	Selección de Equipos	70
4.	DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA FIJA EN CONFIGURACIÓN DE MALLA PARA EL TRANSPORTE DE VOZ APLICADO AL ENTORNO GEOGRÁFICO DEL PROYECTO DE EHAS-SILVIA	72
4.1	SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	72
4.2	SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO	74
4.3	SELECCIÓN DEL CODEC DE AUDIO PARA LA COMPRESIÓN DE VOZ	74
4.4	INTRODUCCIÓN AL ENTORNO GEOGRÁFICO DEL PROYECTO EHAS – SILVIA.....	74
4.4.1	Red EHAS – Silvia.....	75
4.5	CONFIGURACIÓN DEL ENLACE	79
4.5.1	Definición de la Topología del Sistema.....	79
4.5.2	Determinación del Perfil del Trayecto	79
4.6	LEVANTAMIENTO DEL SITIO.....	81
4.6.1	Determinación de LOS y Cálculos de Fresnel	81
4.6.2	Análisis de RF	83
4.6.3	Presupuesto del Enlace	84
4.7	ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN.....	86
4.7.1	Nodo Pasarela.....	86
4.7.2	Nodos de Soporte.....	87
4.7.3	Nodos Cliente.....	88
4.8	SELECCIÓN DE EQUIPOS	89
4.8.1	Estimación de Presupuesto Operativo y de Capital	91
5.	SIMULACIÓN A NIVEL DE SISTEMA DE LA RED INALÁMBRICA EN MALLA EHAS-SILVIA CON LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN NCTUns 3.0	94
5.1	INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN	94
5.2	JUSTIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	94
5.3	NS2	95
5.4	NCTUns 3.0	95
5.5	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	97
5.6	IMPLEMENTACIÓN DE LA WMN PARA LA MICRORRED DE SAN CARLOS SOBRE EL SIMULADOR NCTUns 3.0.....	97
5.7	SIMULACIONES Y RESULTADOS.....	99
5.7.1	Escenario 1: Máxima Cantidad de Saltos Soportados.....	99
5.7.2	Escenario 2: Máxima Cantidad de Llamadas Simultáneas.....	102
5.7.3	Escenario 3: Reestablecimiento de Rutas.....	111
	CONCLUSIONES	118
	RECOMENDACIONES	121
	BIBLIOGRAFÍA	122
	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Arquitectura de una WLAN	3
Figura 1-2. Red inalámbrica en modo <i>ad hoc</i>	4
Figura 1-3. Red inalámbrica en modo de infraestructura	5
Figura 1-4. Ejemplo de una red inalámbrica en malla	6
Figura 1-5. Red inalámbrica en malla con obstáculos	6
Figura 1-6. Redes inalámbricas tradicionales	7
Figura 1-7. Ejemplos de MAPs implementados sobre diferentes sistemas embebidos: (a) Micro Procesador PowerPC y (b) Máquina Risc Avanzada (<i>Advanced Risc Machine, ARM</i>).....	8
Figura 1-8. Ejemplos de clientes de la malla: (a) Portátil, (b) PDA, (c) Teléfonos IP y (d) Wi-Fi RFID...	8
Figura 1-9. Configuración de infraestructura o <i>backbone</i>	9
Figura 1-10. Configuración de cliente WMN	9
Figura 1-11. Configuración híbrida de las WMNs.....	10
Figura 1-12. Única frecuencia, todo sobre el mismo canal	11
Figura 1-13. Doble frecuencia (doble canal), compartiendo el <i>backhaul</i>	11
Figura 1-14. Múltiples frecuencias, enlaces separados para ingreso y salida de <i>backhaul</i>	12
Figura 1-15. Robustez	12
Figura 1-16. Red inalámbrica en malla doméstica.....	15
Figura 1-17. Red inalámbrica en malla residencial	16
Figura 1-18. Red inalámbrica en malla para MAN	17
Figura 1-19. WMN para automatización de edificios	18
Figura 1-20. Red en malla empresarial	18
Figura 1-21. Sistema de compresión G.729	25
Figura 1-22. Paquetes RTP y RTCP para el control de la calidad en recepción	27
Figura 1-23. Encapsulamiento de una trama VoIP	28
Figura 2-1. Familia de estándares inalámbricos.....	32
Figura 2-2. Topologías de red en estrella, árbol y malla	33
Figura 2-3. Red en malla 802.15.4	35
Figura 2-4. Arquitectura WLAN 802.11.....	38
Figura 2-5. Malla WLAN con sus diferentes tipos de dispositivos.....	40
Figura 2-6. Ejemplo de configuración de canales en una malla WLAN.....	42
Figura 2-7. Ejemplos de gráficas de canales unificados en una malla WLAN	42
Figura 2-8. Operación multicanal de dispositivos con un solo radio basados en el CCF	43
Figura 2-9. Interconexión de una malla WLAN con otras LAN. (a) Puente de nivel 2. (b) Interconexión de nivel 3. (c) Interconexión de mallas 802.11s a través de MPPs	45
Figura 2-10. Modelo de referencia para la interconexión de mallas WLAN	46
Figura 2-11. Transporte de datos MAC sobre la malla WLAN	46
Figura 2-12. Formato de trama MAC de la malla	47
Figura 2-13. Campo de control de reenvío en la malla	47
Figura 2-14. Formato de la trama de gestión	48
Figura 2-15. AS junto al MP.....	49
Figura 2-16. AS localizado en una entidad remota	50
Figura 2-17. Entrada de un nodo a la red	53
Figura 2-18. Establecimiento de enlaces entre nodos.....	54
Figura 3-1. Bandas de frecuencia asignadas a Colombia.....	60
Figura 3-2. Canales de frecuencia del estándar IEEE 802.15.4	61
Figura 4-1. Mapa de los establecimientos de salud en el municipio de Silvia	76
Figura 4-2. Topología mixta Wi-Fi – VHF de la red EHAS-Silvia	77
Figura 4-3. Microredes VHF EHAS-Silvia	78
Figura 4-4. LOS del cerro el Tranal con diferentes puntos de interés.....	80
Figura 4-5. Interconexión FIET-Microred San Carlos	83
Figura 4-6. Perfil del enlace FIET-Cerro el Tranal según Radio Mobile.....	85
Figura 4-7. Nodo pasarela ubicado en la FIET	87
Figura 4-8. Nodo de soporte.....	88
Figura 4-9. Nodo cliente.....	89
Figura 5-1. Implementación de la WMN para la microred de San Carlos sobre el simulador NCTUns ..	98
Figura 5-2. Medida del <i>throughput</i> enviado y recibido para llamadas con múltiples saltos.....	100
Figura 5-3. Medida del retardo para llamadas con múltiples saltos	101
Figura 5-4. Medida del <i>jitter</i> para llamadas con múltiples saltos.....	101

Figura 5-5. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas con múltiples saltos	102
Figura 5-6. Medida del <i>throughput</i> enviado y recibido para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos	103
Figura 5-7. Medida del retardo para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos.....	104
Figura 5-8. Medida del <i>jitter</i> para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos	104
Figura 5-9. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos.....	105
Figura 5-10. Medida del <i>throughput</i> enviado y recibido para llamadas simultáneas entre los puestos de salud	106
Figura 5-11. Medida del retardo para llamadas simultáneas entre los puestos de salud	107
Figura 5-12. Medida del <i>jitter</i> para llamadas simultáneas entre los puestos de salud	107
Figura 5-13. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas entre los puestos de salud	108
Figura 5-14. Medida del <i>throughput</i> enviado y recibido para llamadas	109
Figura 5-15. Medida del retardo para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos	110
Figura 5-16. Medida del <i>jitter</i> para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos .	110
Figura 5-17. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos	111
Figura 5-18. Medida del <i>throughput</i> enviado y recibido para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos	112
Figura 5-19. Medida del retardo para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos	113
Figura 5-20. Medida del <i>jitter</i> para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos	113
Figura 5-21. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos.....	114
Figura 5-22. Medida del <i>throughput</i> enviado y recibido para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud	115
Figura 5-23. Medida del retardo para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud	116
Figura 5-24. Medida del <i>jitter</i> para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud	116
Figura 5-25. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Comparación entre las topologías de red	13
Tabla 1-2. Codecs utilizados para VoIP	26
Tabla 1-3. Clases de calidad de la ITU según retardos de transmisión.....	29
Tabla 1-4. Retardos de paquetización	29
Tabla 1-5. Retardos algorítmicos.....	29
Tabla 2-1. Actuales propuestas del IEEE 802.11s	40
Tabla 2-2. Combinaciones válidas de tipos y subtipos.....	47
Tabla 2-3. Especificaciones PHY para el estándar IEEE 802.16-2004.....	52
Tabla 2-4. Comparación de las tecnologías inalámbricas IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16	55
Tabla 3-1. Interfaces del enlace radio WLAN de IEEE 802.11	60
Tabla 3-2. Cantidad de radios soportados por los productos 802.11x.....	63
Tabla 3-3. Criterios para el diseño de redes inalámbricas en malla fijas para entornos rurales	71
Tabla 4-1. Evaluación de los criterios para la selección de la tecnología	72
Tabla 4-2. Datos georeferenciados del LCBC.....	79
Tabla 4-3. Datos georeferenciados del repetidor del cerro el Tranal	80
Tabla 4-4. Datos georeferenciados del hospital San Carlos	81
Tabla 4-5. Datos georeferenciados de los puestos de salud dependientes del hospital San Carlos.....	81
Tabla 4-6. Valores asumidos para los cálculos del presupuesto del enlace	84
Tabla 4-7. Precio de algunos equipos que implementan las propiedades de las WMNs.....	90
Tabla 4-8. Equipos requeridos en el nodo pasarela	91
Tabla 4-9. Equipos requeridos en cada uno de los nodos de soporte	92

Tabla 4-10. Equipos requeridos en cada uno de los nodos cliente	92
Tabla 4-11. Presupuesto estimado para la conexión de la microrred de San Carlos	93
Tabla 5-1. Configuración de protocolo RTP	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.	DESCRIPCIÓN DE LOS ESTÁNDARES BASE IEEE 802.15.4, 802.11 Y 802.16
ANEXO B.	PROPUESTA CONJUNTA DE SEE-MESH Y WI-MESH PARA EL 802.11 TGs
ANEXO C.	ESPECIFICACIÓN WirelessMAN-OFDM PHY DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16-2004
ANEXO D.	TRATAMIENTO A NIVEL MAC DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16-2004 PARA LA TOPOLOGÍA DE MALLA
ANEXO E.	ANÁLISIS DE LOS TRAYECTOS DE PROPAGACIÓN DE LA WMN PARA LA MICRORRED DE SAN CARLOS
ANEXO F.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES A LA SIMULACIÓN A NIVEL DE SISTEMA DE LA WMN PARA LA MICRORRED DE SAN CARLOS
ANEXO G.	IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA EN MALLA SOBRE NCTUNS 3.0

LISTA DE ACRÓNIMOS

3DES:	Estándar de Encriptación Triple de Datos (<i>Triple Data Encryption Standard</i>)
AAS:	Sistemas de Antenas Adaptativas (<i>Adaptive Antenna Systems</i>)
ACK:	Acuse de Recibo (<i>Acknowledgment</i>)
ACL:	Lista de Control de Acceso (<i>Access Control List</i>)
ADPCM:	Modulación por Impulsos Codificados Diferencial Adaptativa (<i>Adaptive Differential Pulse Code Modulation</i>)
AES:	Estándar Avanzado de Encriptación (<i>Advanced Encryption Standard</i>)
AODV:	Vector Distancia Ad hoc sobre Demanda (<i>Ad hoc On-Demand Distance Vector</i>)
AP:	Punto de Acceso (<i>Access Point</i>)
API:	Interfaz de Programación de Aplicaciones (<i>Application Programming Interface</i>)
APL:	Nivel de Aplicación (<i>Application</i>)
ARM:	Máquina Risc Avanzada (<i>Advanced Risc Machine</i>)
ARQ:	Solicitud de Repetición Automática (<i>Automatic Repeat Request</i>)
AS:	Servidor de Autenticación (<i>Authentication Server</i>)
ATM:	Modo de Transferencia Asíncrono (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>)
BACNET:	Redes de Control y Automatización de Edificios (<i>Building Automation and Control Networks</i>)
BER:	Tasa de Errores de Bits (<i>Bit Error Rate</i>)
BPDU:	Unidades de Datos del Protocolo Puente (<i>Bridge Protocol Data Units</i>)
BPSK:	Modulación de Cambio de Fase Binaria (<i>Binary Phase Shift Keying</i>)
BSS:	Conjunto de Servicios Básicos (<i>Basic Service Set</i>)
BSSID:	Identificador del BSS (<i>BSS Identifier</i>)
BWA:	Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (<i>Broadband Wireless Access</i>)
CBR:	Velocidad Constante de Bit (<i>Constant Bit Rate</i>)
CCA:	Valoración de Canales Desocupados (<i>Clear Channel Assessment</i>)
CCF:	Framework de Canal Común (<i>Common Channel Framework</i>)
CKK:	Modulación de Código Complementario (<i>Complementary Code Keying</i>)
CCN:	Centro Coordinador Nacional
CCW:	Ventana de Coordinación del Canal (<i>Channel Coordination Window</i>)
CDMA:	Acceso Múltiple por División de Código (<i>Code Division Multiple Access</i>)
CF:	Competencia Libre (<i>Free Contention</i>)
CFA:	Llamada para Aplicaciones (<i>Call For Applications</i>)
CFP:	Llamada para Propuestas (<i>Call For Proposals</i>)
CID:	Identificador de Cluster (<i>Cluster Identifier</i>)
CLH:	Cabecera del Cluster (<i>Cluster Head</i>)
CPS:	Subnivel de Parte Común (<i>Common Part Sublayer</i>)
CS:	Subnivel de Convergencia de Servicios Específicos (<i>Service-Specific Convergente Sublayer</i>)
CSMA/CA:	Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>)

CS-ACELP: Predicción Lineal con Excitación por Código Algebraico de Estructura Conjugada de Complejidad Reducida (*Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction*)

CTX: Listo para Cambiar (*Clear To Switch*)

DA: Dirección de Destino (*Destination Address*)

DBPSK: Modulación de Cambio de Fase Binaria Diferencial (*Differential Binary Phase Shift Keying*)

DCF: Función de Coordinación Distribuida (*Distributed Coordination Function*)

DFS: Selección Dinámica de Frecuencia (*Dynamic Frequency Selection*)

DIFFSERV: Servicios Diferenciados (*DIFFerentiated SERVices*)

DoD: Departamento de Defensa (*Department of Defense*)

DQPSK: Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura Diferencial (*Differential Quadrature Phase Shift keying*)

DS: Sistema de Distribución (*Distribution System*)

DSL: Línea Digital de Abonado (*Digital Subscriber Line*)

DSS: Servicios del Sistema de Distribución (*Distribution System Service*)

DSSS: Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*)

DSR: Enrutamiento de Fuente Dinámico (*Dynamic Source Routing*)

DVD: Discos Versátiles Digitales (*Digital Versatile Disc*)

EAP: Protocolo de Autenticación Extensible (*Extensible Authentication Protocol*)

EAS: Estándar de Encriptación Avanzada (*Advanced Encryption Standard*)

ED: Detección de Energía (*Energy Detection*)

EDCA: Acceso de Canal Distribuido Mejorado (*Enhanced Distributed Channel Access*)

EHAS: Enlace Hispanoamericano de Salud

ESS: Conjunto de Servicios Extendidos (*Extended Service Set*)

FDD: Duplexación por División de Frecuencia (*Frequency Division Duplexing*)

FFD: Dispositivo de Función Completa (*Full Function Device*)

FFT: Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformation*)

FHSS: Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)

FIET: Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

GFSK: Modulación de Frecuencia Gaussiana (*Gaussian Frequency Shift Keying*)

GIDATI: Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática

GNTT: Grupo de Investigación y Desarrollo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

GPL: Licencia Pública General (*General Public License*)

GPRS: Servicio General de Paquetes de Radio (*General Packet Radio Service*)

GPS: Sistema de Posicionamiento Global (*Global Positioning System*)

GSM: Sistema Global para comunicaciones Móviles (*Global System for Mobile communications*)

GTS: Intervalo de Tiempo Garantizado (*Guaranteed Time Slot*)

GUI: Interfaz Gráfica de Usuario (*Graphical User Interface*)

HDTV: Televisión de Alta Definición (*High Definition Television*)

HFC: Híbrido de Fibra y Coaxial (*Hybrid Fiber/Coaxial*)

HR/DSSS: Espectro Ensanchado por Secuencia Directa de Alta Velocidad (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum*)

IBSS: Conjunto de Servicios Básicos Independiente (*Independent Basic Service Set*)

ID: Identificador

IE: Elemento de Información (*Information Element*)

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

IETF: Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet (*Internet Engineering Task Force*)

IFS: Espacio de Intertrama (*Interframe Space*)

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

ILBC: Codec de Internet de Baja velocidad de Bit (*Internet Low Bitrate Codec*)

INTSERV: Servicios Integrados (*INTegrated SERVices*)

IP: Protocolo de Internet (*Internet Protocol*)

ISDN: Red Digital de Servicios Integrados (*Integrated Services Digital Network*)

ISM: Industrial, Científica y Médica (*Industrial, Scientific and Medical*)

ISP: Proveedor de Servicios de Internet (*Internet Service Provider*)

ITS: Sistemas de Transporte Inteligente (*Intelligent Transportation Systems*)

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones (*Internacional Telecommunication Union*)

LAN: Red de Área Local (*Local Area Network*)

LCBC: Laboratorio de Comunicaciones de Bajo Costo

LD-CELP: Predicción Lineal con Excitación por Código de Bajo Retardo (*Low Delay Code Excited Linear Prediction*)

LOS: Línea de Vista (*Line of Sight*)

LQI: Indicación de la Calidad del Enlace (*Link Quality Indication*)

LR-WPAN: Red Inalámbrica de Área Personal de Baja Velocidad (*Low-Rate Wireless Personal Area Network*)

MAC: Control de Acceso al Medio (*Medium Access Control*)

MAN: Red de Área Metropolitana (*Metropolitan Area Network*)

MANET: Redes Móviles Ad hoc (*Mobile Ad hoc Network*)

MAP: Punto de Acceso a la Malla (*Mesh Access Point*)

MIB: Base de Información de Gestión (*Management Information Base*)

MIMO: Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (*Multiple-Input Multiple-Output*)

MIT: Instituto Tecnológico de Massachussets (*Massachusetts Institute of Technology*)

MMPDU: Unidad de Datos del Protocolo de Administración MAC (*MAC Management Protocol Data Unit*)

MOS: Puntuación de Opinión Media (*Mean Opinion Store*)

MP: Punto de Malla (*Mesh Point*)

MPDU: Unidades de Datos del Protocolo MAC (*MAC Protocol Data Unit*)

MPP: Punto de Malla con Portal (*Mesh Point Portal*)

MSDU: Unidades de Datos del Servicio MAC (*MAC Service Data Unit*)

NAM: Animador de Red (*Network Animator*)

NAV: Vector de Asignación de Red (*Network Allocation Vector*)

NCTUns: Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung (*National Chiao Tung University Network Simulator*)

NIC: Tarjeta de Red Inalámbrica (*Network Interface Card*)

NLOS: Sin línea de Vista (*Non Line of Sight*)

NS2: Simulador de Redes (*Network Simulator*)

NWK: Nivel de Red (*Network*)

OEM: Fabricantes Originales de Equipos (*Original Equipment Manufacturer*)

OFDM: Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

OFDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*)

OLSR: Protocolo de Enrutamiento por Optimización de Estado de Enlace (*Optimized Link State Routing Algorithm*)

O-QPSK: Conmutación de Fase en Cuadratura Desplazada (*Offset Quadrature Phase-Shift Keying*)

OSI: Interconexión de Sistemas Abiertos (*Open Systems Interconnection*)

P2P: Redes de Igual a Igual (*Peer to Peer*)

PAN: Red de Área Personal (*Personal Area Network*)

PAR: Solicitud de Autorización del Proyecto (*Project Authorization Request*)

PC: Punto Coordinador (*Point Coordinator*)

PCF: Función de Coordinación Puntual (*Point Coordination Function*)

PCM: Modulación por Impulsos Codificados (*Pulse Code Modulation*)

PDA: Agendas Digitales Personales (*Personal Digital Assistant*)

PHY: Capa Física (*Physical*)

PIFS: Espacio de Intertrama PCF (*PCF Interframe Space*)

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Efectivamente

PLCP: Protocolo de Convergencia del Nivel Físico (*Physical Layer Convergence Protocol*)

PMD: Dependiente del Medio Físico (*Physical Medium Dependent*)

PMP: Punto a Multipunto (*Point to MultiPoint*)

PS: Conservación de Energía (*Power Save*)

PS-STAs: Estaciones con Conservación de Energía (*Power Save Station*)

PTP: Punto a Punto (*Point to Point*)

QAM: Modulación por Amplitud en Cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*)

QoS: Calidad de Servicio (*Quality of Service*)

QPSK: Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura (*Quadrature Phase Shift keying*)

RFD: Dispositivo de Función Reducida (*Reduced Function Device*)

RFID: Identificación por Radio Frecuencia (*Radio Frequency IDentification*)

RERRs: Error de Rutas (*Route Errors*)

RREPs: Respuesta de Rutas (*Route Reply*)

RREQs: Petición de Rutas (*Route Requests*)

RSNA: Asociación de Red con Seguridad Robusta (*Robust Security Network Association*)

RSVP: Protocolo de Reserva de Recursos (*Resource ReSerVation Protocol*)

RTCP: Protocolo de Control RTP (*RTP Control Protocol*)
RTP: Protocolo de Transporte en Tiempo Real (*Real Time Transport Protocol*)
RTPC: Red Telefónica Pública Conmutada
RTX: Solicitud de Cambio (*Request To Switch*)
SA: Dirección de Fuente (*Source Address*)
SAP: Punto de Acceso al Servicio (*Service Access Point*)
SC: Portadora Única (*Single Carrier*)
SDP: Protocolo de Descripción de Sesión (*Session Description Protocol*)
SIP: Protocolo de Inicio de Sesión (*Session Initiation Protocol*)
SOFDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales Escalable (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*)
SOM: Margen Operativo del Sistema (*System Operative Margin*)
SS: Servicios de Estación (*Station Service*)
SSID: Identificador de Conjunto de Servicios (*Service Set Identifier*)
STA: Estación (*Station*)
STP: Protocolo de Expansión de Árbol (*Spanning Tree Protocol*)
TBPRF: Difusión de la Topología Basada en el Reenvío de la Ruta Inversa (*Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding*)
TC: Control de Topología (*Topology Control*)
TCL: Lenguaje de Herramientas de Comando (*Tool Command Language*)
TCP: Protocolo de Control de Transmisión (*Transmission Control Protocol*)
TDD: Duplexación por División de Tiempo (*Time Division Duplexing*)
TDMA: Acceso Múltiple por División de Tiempo (*Time Division Multiple Access*)
TG: Grupo de Trabajo (*Task Group*)
TIM: Mapa de Indicación de Tráfico (*Traffic Indication Map*)
TKIP: Protocolo de Integridad de Clave Temporal (*Temporal Key Integrity Protocol*)
TPC: Control de Potencia de Transmisión (*Transmission Power Control*)
TSF: Función de Sincronización de Tiempo (*Timing Synchronization Function*)
TTL: Tiempo de Vida (*Time to Live*)
UCG: Gráfica de Canal Unificado (*Unified Channel Graph*)
UDP: Protocolo de Datagramas de Usuario (*User Datagram Protocol*)
UPS: Sistema de Alimentación Ininterrumpida (*Uninterruptible Power Supply*)
VAD: Detección de Actividad de la Voz (*Voice Activity Detection*)
VBR: Velocidad Variable de Bit (*Variable Bit Rate*)
VHF: Frecuencias Muy Altas (*Very High Frequency*)
VoIP: Voz sobre el Protocolo de Internet (*Voice over Internet Protocol*)
VPN: Red Privada Virtual (*Virtual Private Network*)
WAN: Red de Área Amplia (*Wide Area Network*)
WDS: Sistema de Distribución Inalámbrica (*Wireless Distribution System*)
WEP: Privacidad Equivalente Cableada (*Wired Equivalent Privacy*)
Wi-Fi: Alianza de Fidelidad Inalámbrica (*Wireless Fidelity Alliance*)
WiMAX: Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)
WINA: Alianza para la Interconexión Inalámbrica Industrial (*Wireless Industrial Networking Alliance*)
WLAN: Red de Área Local Inalámbrica (*Wireless Local Area Network*)
WMAN: Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (*Wireless Metropolitan Area Network*)
WMN: Redes Inalámbricas en Malla (*Wireless Mesh Network*)
WPA: Acceso Wi-Fi Protegido (*Wi-Fi Protected Access*)

RESUMEN

En este documento se presenta el estudio de las redes inalámbricas en malla en sus aspectos característicos, tales como su arquitectura de red, tipos de configuración, escenarios de aplicación y protocolos de enrutamiento, lo cual permite entender su funcionamiento, la manera como se implementan e identificar sus capacidades. Además se estudian los estándares de compresión de voz y los factores que deben tenerse en cuenta para transportar voz con buena calidad en este tipo de redes.

Seguidamente, se realiza un análisis completo del funcionamiento de la malla en los estándares IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16 y el proceso de estandarización que cada uno de ellos adelanta para habilitar el modo de operación en malla en su totalidad. A partir de esta apropiación tecnológica se definen los criterios necesarios para asegurar un correcto diseño de soluciones inalámbricas en malla que permitan transportar voz en ambientes rurales, teniendo en cuenta las limitaciones físicas, técnicas, económicas, políticas y demográficas que imponen estas zonas apartadas.

Teniendo en cuenta los criterios establecidos se procede a realizar un diseño específico de una red inalámbrica en malla fija para una de las microredes del proyecto EHAS-Silvia, abarcando cada uno de los pasos de la ingeniería de radioenlaces y se verifica su funcionamiento a través de la implementación de una simulación de la red en la herramienta NCTUns 3.0, siguiendo la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones.

Además de comprobar el funcionamiento correcto de la red implementada, el simulador permite determinar la máxima capacidad de la red en cuanto al número de llamadas soportadas cuando se evalúan factores característicos de las redes en malla como el número de saltos que soporta una llamada, simultaneidad de llamadas, y caída y reestablecimiento de rutas.

Los resultados demuestran que el aumento del número de saltos por los que atraviesa una comunicación no generan pérdidas considerables en la llamada por lo cual es posible comunicar todos los puntos de la malla por más distantes que estos se encuentren. Además, se encontró que cuando se realizan llamadas a un solo punto, es posible comunicar 5 de los 8 nodos al mismo tiempo, lo que representa un buen porcentaje de comunicación. Por otro lado, cuando se realizan llamadas simultáneas entre puntos más lejanos, la red permite comunicar solo 4 nodos a la vez, debido al mayor número de saltos. Por último, se analizó el efecto de la caída de un nodo en la comunicación identificando que el tiempo de reestablecimiento de la ruta es de aproximadamente 30 segundos, los cuales no son aptos para mantener una comunicación constante, razón por la cual se concluye que ante este evento, la llamada efectivamente se pierde, sin embargo, el nivel de disponibilidad mejora con respecto al que se presenta en la actual red de EHAS-Silvia pues, la falla de un nodo no representa la suspensión total del servicio, ni requiere del desplazamiento de personal técnico como ocurre en este momento.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existe una considerable brecha tecnológica entre las zonas urbanas y rurales que se evidencia principalmente porque en gran parte de la población rural la comunicación telefónica es escasa, costosa, deficiente e inclusive nula en los sitios más apartados. La mayoría de los sistemas de comunicación telefónica (fija o móvil) presentan una arquitectura lineal en la cual cada usuario tiene una conexión directa con una estación central que se encarga de atender la solicitud de llamada y realizar el proceso de conexión entre los usuarios. Este tipo de arquitectura funciona muy bien en áreas urbanas donde el desarrollo de la infraestructura vial facilita el proceso de la conexión, pero si dicha arquitectura se implementa en un entorno rural su eficiencia tiende a disminuir debido a la dificultad de sobrepasar múltiples obstáculos presentes por las condiciones geográficas adversas, lo cual imposibilita el cubrimiento total de la zona con un solo trayecto. Asimismo, los problemas de acceso a sitios tan remotos dificultan el mantenimiento preventivo y correctivo de estos sistemas y por lo tanto, su funcionamiento, ya que en el momento en que se presenta una falla la comunicación se interrumpe por completo puesto que el sistema no tiene rutas alternas de envío de información y el tiempo de reparación de estas fallas puede tardar varios días.

Por otro lado, factores como la alta dispersión de la población y la baja capacidad de pago que se presentan en las áreas rurales hacen que los servicios suministrados por las empresas de telefonía fijas o móviles sean de alto costo y poco rentables, pues la mayoría de estos sistemas requieren de una alta demanda de sus servicios para recuperar el valor de las inversiones realizadas en infraestructura y costo de mantenimiento del sistema debido a las dificultades de acceso. Además, aunque en el momento el servicio de telefonía celular se ha extendido por varias poblaciones aun existen puntos muy distantes y poco habitados donde la señal no llega o tiene una calidad deficiente.

Con el fin de mejorar los procesos de comunicación de estos entornos apartados, las entidades gubernamentales y algunas fundaciones internacionales sin ánimo de lucro como EHAS, lideran proyectos sociales para brindar acceso a los servicios de telecomunicaciones, principalmente telefonía e Internet. Gracias a la implementación de estos proyectos se logra llevar soluciones de comunicación a algunas de las localidades rurales más apartadas de la geografía colombiana. Sin embargo, estas soluciones (en su mayoría realizadas con tecnologías satelitales o VHF) no satisfacen completamente las necesidades requeridas, puesto que para implementarse efectivamente se necesitan inversiones muy altas para el usuario final a pesar del apoyo financiero de las diferentes entidades y en otros casos carecen de las capacidades necesarias para llegar hasta los puntos más lejanos con grandes anchos de banda y sin retardos.

El desarrollo de las tecnologías inalámbricas representa una alternativa viable para resolver las necesidades de comunicación de entornos urbanos y rurales. El creciente interés del mercado mismo por nuevas y más funcionalidades que integren datos, voz y video; así como la incorporación de nuevos servicios obliga a los fabricantes a desarrollar estas soluciones urgentemente. En consecuencia y como respuesta a las investigaciones y desarrollos de la industria inalámbrica y móvil, hoy muchas empresas se están avocando a estas soluciones, ya sea para comunicación interna dentro de los perímetros de un edificio o para interconectar establecimientos distantes entre sí.

Las redes inalámbricas en malla juegan un papel importante en estos nuevos avances y permiten mejorar el proceso de comunicación, pues, presentan una configuración flexible que hace posible que varios nodos puedan conectarse entre sí sin la existencia de un punto central de coordinación, en su lugar cada nodo tiene funciones de enrutamiento, y así, el transporte de la información puede realizarse en cualquier dirección y se facilita la existencia de rutas redundantes. Esta tecnología poco a poco empieza a ganar credibilidad hasta el punto en que grandes compañías del mercado ya ofrecen soluciones propietarias de interconexión inalámbrica en malla, lo cual evidencia la necesidad de trabajar por la estandarización de estas redes para que puedan desplegarse por todo el mercado con mayor eficiencia y economía. Es así como dentro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*¹) se han formado diferentes grupos de trabajo

¹ Organización internacional que agrupa a los ingenieros eléctricos y electrónicos y desarrolla estándares internacionales en las tecnologías eléctricas y electrónicas; en particular, el subgrupo de estándares 802 desarrolla los estándares para redes de área local y área metropolitana.

tanto para redes de área personal, local y metropolitana, con el fin de estudiar las características necesarias para implementar este tipo de redes.

La interconexión de entornos rurales es un escenario de aplicación bastante interesante de las redes inalámbricas en malla, pues, debido a las condiciones geográficas, económicas y técnicas que impone este ambiente es necesario buscar una solución de interconexión que sea bastante flexible, autoconfigurable, escalable y económica. Tales condiciones son precisamente las características que diferencian y resaltan este nuevo tipo de redes y por lo tanto resulta interesante analizar su comportamiento y comprobar su efectividad. Sin embargo, ésta tecnología aún se encuentra en su fase de desarrollo y por tanto, los costos en equipos y componentes son muy altos; por lo cual se presentan algunas dificultades para hacer estudios con equipos reales pues la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca no cuenta con los laboratorios necesarios para realizar un acercamiento y un aprendizaje práctico sobre esta tecnología. Ante esta limitante, el Grupo de Investigación y Desarrollo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNNT) ha considerado la gran potencialidad de las metodologías y herramientas *software* de simulación de redes para el estudio de nuevas tecnologías pues permiten simular ambientes reales con gran aproximación logrando importantes objetivos académicos e investigativos.

En este trabajo de grado se estudia el funcionamiento y estandarización de las redes inalámbricas en malla fijas y se analiza la efectividad que tiene el transporte de Voz sobre IP (*Voice Over Internet Protocol*, VoIP) en este tipo de redes, al considerarse un servicio que demanda requerimientos mayores de calidad que lo que pudiera necesitar una aplicación como el acceso a Internet y se valida a través de un diseño específico implementado para una de las microredes del Proyecto EHAS-Silvia y su posterior simulación en una herramienta de libre distribución que permite comprobar su correcto funcionamiento y la máxima capacidad de la red ante factores como la cantidad de saltos, simultaneidad de llamadas y reestablecimiento de rutas.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo de este proyecto, el contenido consta de 5 capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se realiza un estudio de la tecnología de redes inalámbricas en malla en aspectos como sus características, ventajas, arquitectura de red, aplicaciones y algoritmos de enrutamiento más importantes. Además, se revisan los aspectos principales de la transmisión de VoIP en este tipo de redes.

En el Capítulo 2 se introduce una comparación de los aspectos técnicos más sobresalientes de las tecnologías inalámbricas IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16-2004 que operan en configuración de malla. La adquisición del marco teórico de estas tecnologías es sumamente importante para identificar el modelo de red adecuado para el transporte de VoIP en una red inalámbrica fija en configuración de malla para ambientes rurales.

En el Capítulo 3 se define el conjunto de criterios necesarios para el correcto diseño de una solución de comunicación inalámbrica en malla fija, que interconecte sitios remotos como los de un entorno rural. Inicialmente se establecen los requisitos y limitaciones que impone un ambiente rural para la implementación de nuevas tecnologías de comunicación y seguidamente se definen los criterios de negocio, tecnológicos y de diseño, a tener en cuenta en el momento de la implementación de la red.

En el Capítulo 4 se justifica la selección de la tecnología inalámbrica con operación en malla, el protocolo de enrutamiento y el codec de audio más adecuados para la transmisión de VoIP en entornos rurales. Posteriormente se observa el actual funcionamiento y topología de la red de EHAS-Silvia y se procede a realizar el diseño específico de la red inalámbrica en malla fija para una de sus microredes; abarcando cada uno de los pasos de la ingeniería de radioenlaces.

Por último, en el Capítulo 5 se identifican las herramientas de simulación de libre distribución para redes inalámbricas en malla y se justifica la selección del simulador NCTUns 3.0 para la implementación del diseño final obtenido en el capítulo 4. Seguidamente se implementa un modelo de simulación de red inalámbrica en malla para la microred de San Carlos sobre el simulador seleccionando siguiendo la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones. Finalmente se evalúa el comportamiento de la red y se determina su capacidad máxima ante factores como el número de saltos, cantidad de tráfico y caída de nodos.

1. FUNDAMENTOS DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN MALLA Y DE LA VOIP

1.1 GENERALIDADES DE REDES INALÁMBRICAS

Una Red de Área Local Inalámbrica (*Wireless Local Area Network, WLAN*) puede definirse como una red de corto alcance que tiene como medio de transmisión el aire, su velocidad de transferencia de datos es relativamente alta (mayor o igual a 1 Mbps) con baja tasa de errores y administrada en forma privada, según especificaciones del IEEE. La misma utiliza ondas electromagnéticas para conectar los diferentes equipos o terminales móviles asociados a la red con enlaces que se implementan básicamente a través de tecnologías de microondas e infrarrojos, eliminando así, la necesidad de conexiones cableadas y proporcionando al usuario la capacidad de trasladarse dentro del área de cobertura de la red sin necesidad de perder la conexión. La tecnología inalámbrica permite crear sistemas flexibles de comunicación de voz y datos que pueden implementarse como una extensión o directamente como una alternativa a una red cableada, permitiendo a sus usuarios acceder a información y recursos en tiempo real sin necesidad de conectarse físicamente a un determinado lugar, por lo cual son muy útiles en zonas donde las condiciones geográficas y económicas no permiten el tendido de cables.

Los Puntos de Acceso (*Access Point, AP*) se utilizan para irradiar las ondas electromagnéticas y para realizar tareas de administración de la red, estos son el equivalente de los *hubs* o *switches* en las redes cableadas, los mismos suelen conectarse al *backbone*² de la red. Todos los usuarios de un mismo AP se encuentran en el mismo dominio de colisión de la red debido a que comparten el mismo medio para transmitir y recibir información, por lo que al aumentar el número de terminales conectados a la red disminuye la velocidad efectiva de la misma. En la Figura 1-1 [1] se muestran los elementos básicos que conforman una WLAN. El atractivo fundamental de este tipo de redes es la facilidad de instalación, la capacidad de movilidad, la flexibilidad en su arquitectura que permite a la red llegar a puntos de difícil acceso para una red cableada, un costo menor en el mantenimiento y una escalabilidad que permite configurar gran variedad de topologías para satisfacer las necesidades de las instalaciones y aplicaciones específicas. Las configuraciones son muy fáciles de cambiar y además resulta muy fácil la incorporación de nuevos usuarios a la red.

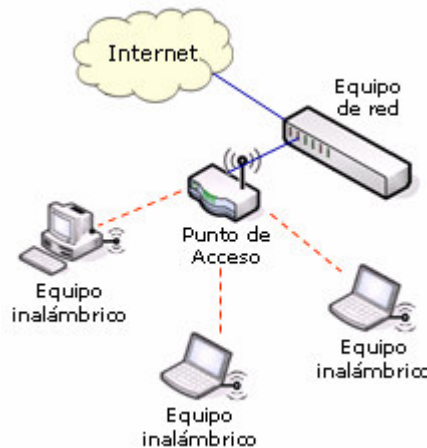


Figura 1-1. Arquitectura de una WLAN

Para participar de una red inalámbrica, los terminales o nodos de la red deben tener una interfaz de red inalámbrica, la cual se encarga de realizar las funciones del nivel de enlace de datos y físico, entre las cuales se encuentran: acceder al medio, realizar las modulaciones y codificaciones necesarias para la correcta transmisión, realizar los análisis de la potencia en la transmisión, etc.

² Es la vía principal dentro de una red, que ofrece la mayor velocidad posible, y que conecta todos los nodos principales.

Para la correcta comunicación de los nodos en el medio inalámbrico, es necesario establecer parámetros físicos de control de la conexión, frecuencias de trabajo, anchos de banda, modulaciones, codificación de la información, etc. Esto requiere un profundo proceso de estandarización que viene desarrollándose y mejorándose poco a poco desde 1997 cuando se creó el primer estándar IEEE 802.11 para la interconexión de redes inalámbricas y se explicará con más detalle en el capítulo 2.

1.1.1 Topologías de Red

El grado de complejidad de una red de área local inalámbrica es variable y dependiendo de las necesidades a cubrir y en función de los requerimientos del sistema que se quiera implementar, se pueden utilizar diversas topologías de red, las cuales se describen a continuación.

1.1.1.1 Redes *ad hoc*

También conocidas como redes de Igual a Igual (*Peer to Peer*, P2P), es la configuración más sencilla de todas. Consiste en una red de dos o más terminales móviles equipados con un adaptador para comunicaciones inalámbricas, como los que se ilustra en la Figura 1-2 [2], cada terminal funciona como un nodo, sólo se dispone de un Identificador de Conjunto de Servicios (*Service Set ID*, SSID) igual para todos los nodos. A mayor dispersión geográfica de cada nodo más dispositivos pueden formar parte de la red, sin embargo, no se debe sobrepasar un número razonable de dispositivos, de lo contrario el rendimiento del sistema se verá comprometido. Para que la comunicación entre estas estaciones sea posible hace falta que estén en el rango de cobertura radioeléctrica de al menos una de las estaciones que conforman la red. Las redes de tipo *ad hoc* no requieren ningún tipo de gestión administrativa por lo que su implementación es la más fácil y económica.

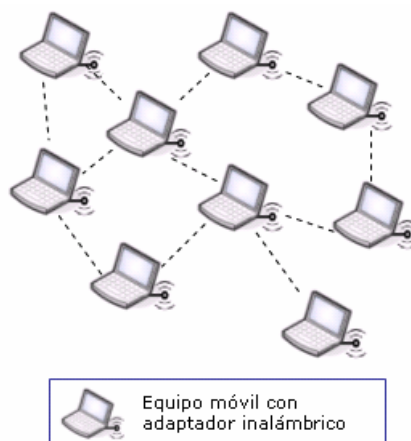


Figura 1-2. Red inalámbrica en modo *ad hoc*

1.1.1.2 Redes de infraestructura

Para aumentar el alcance de una red del tipo anterior hace falta la instalación de un punto de acceso. Con este nuevo elemento se dobla el alcance de la red inalámbrica (en este caso la distancia máxima permitida no se mide entre estaciones, sino entre cada estación y el punto de acceso). Esta configuración utiliza celdas que representan el área efectiva de la señal radioeléctrica irradiada por el AP. A pesar que en el caso de las redes inalámbricas esta celda suele tener un tamaño reducido, mediante el uso de varias fuentes de emisión es posible cubrir un área más extensa, como se muestra en la Figura 1-3 [1].

La topología de tipo infraestructura es capaz de brindar a una red inalámbrica mayores capacidades de expansión y de configuración. Además del evidente incremento del alcance de la red debido a la utilización de uno o varios puntos de acceso, esta permite lo que se conoce como *roaming*, es decir, que los terminales puedan moverse de un AP a otro sin perder la cobertura y sin sufrir cortes en la comunicación, representando esto una de las características más interesantes de las redes inalámbricas. Otro beneficio adicional lo constituye el hecho de que los APs se pueden conectar a una red cableada, por lo que es posible formar redes híbridas (*WLAN-Ethernet*) para así proporcionar

acceso a Internet. Al utilizar dicha configuración los usuarios deben comunicarse únicamente con los AP (no existe comunicación entre ellos), los cuales realizan las tareas de administración necesarias para permitir que todos dispongan de los recursos de la red. En el momento en que un AP falle, la red queda deshabilitada por completo y se pierden todas las conexiones, por lo que se considera que la topología de infraestructura es relativamente poco confiable.

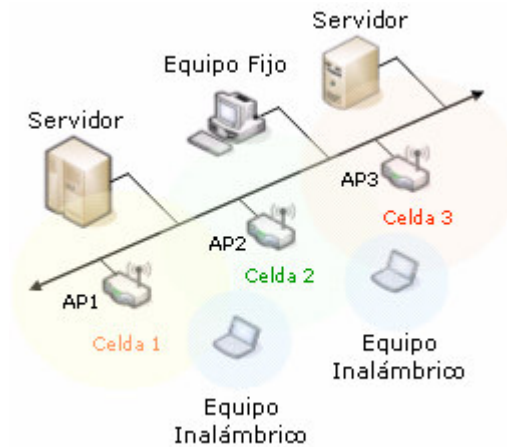


Figura 1-3. Red inalámbrica en modo de infraestructura

1.1.1.3 Redes inalámbricas en malla

Las Redes Inalámbricas en Malla (*Wireless Mesh Network, WMN*) son aquellas en las que se mezclan las dos configuraciones anteriormente explicadas. Básicamente, son redes con topología de infraestructura que le permiten a aquellos dispositivos inalámbricos que se encuentran fuera del área de cobertura del AP, pero dentro del rango de señal útil de algún dispositivo inalámbrico, conectarse a la red utilizando el equipo adyacente como enlace.

La topología en malla permite que las tarjetas de red inalámbricas se comuniquen entre sí independientemente del punto de acceso, lo que significa que los dispositivos que se encuentran fuera del alcance del AP pueden enviar sus paquetes a una estación cercana para que ésta los transmita al punto de acceso. Para que esto sea posible es necesario contar con un protocolo de enrutamiento que permita transmitir la información hasta su destino con el mínimo número de saltos posibles. Este tipo de configuración es bastante confiable ya que la caída de un nodo no implica la caída de la red.

Actualmente, existe un interés elevado, tanto comercial como investigativo, sobre la aplicación de arquitecturas de redes en malla en las comunicaciones inalámbricas, donde la variedad de fabricantes que tienen productos para WMNs denotan este creciente interés en la industria, además, los principales grupos de estandarización se encuentran definiendo estándares WMN que permitirán una mayor implantación de estas redes e interoperabilidad entre ellas. El presente capítulo entrega una descripción básica de conceptos generales relacionados con las redes inalámbricas en malla, por el interés que para este proyecto reviste la aplicación de estas redes en la conectividad inalámbrica sobre áreas rurales para el mejoramiento de las comunicaciones de estas zonas aisladas.

1.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN MALLA

La red inalámbrica en malla, también conocida como red de "múltiples saltos" [3] es una nueva y mejorada arquitectura que extiende el alcance de la tecnología inalámbrica para redes de área local y es flexible para la transferencia eficaz de datos entre dispositivos inalámbricos.

Una red en malla está compuesta por una colección de nodos que se comunican entre sí de manera directa, si no existe una entidad centralizada que controle estos equipos se dice que la malla actúa en el modo de operación distribuido, pero si existe una entidad central que administre las condiciones de operación de la red, el modo se conoce como centralizado. En cualquier caso, la comunicación se realiza entre los nodos directamente y cada nodo puede ser al mismo tiempo fuente o destino de los datos o un enrutador de la información de otro nodo. En la Figura 1-4 [4] se muestra un diagrama de

una red de múltiples saltos, donde la información se transmite desde un extremo a otro a través de diferentes enrutadores y *gateways* para dar acceso a Internet.

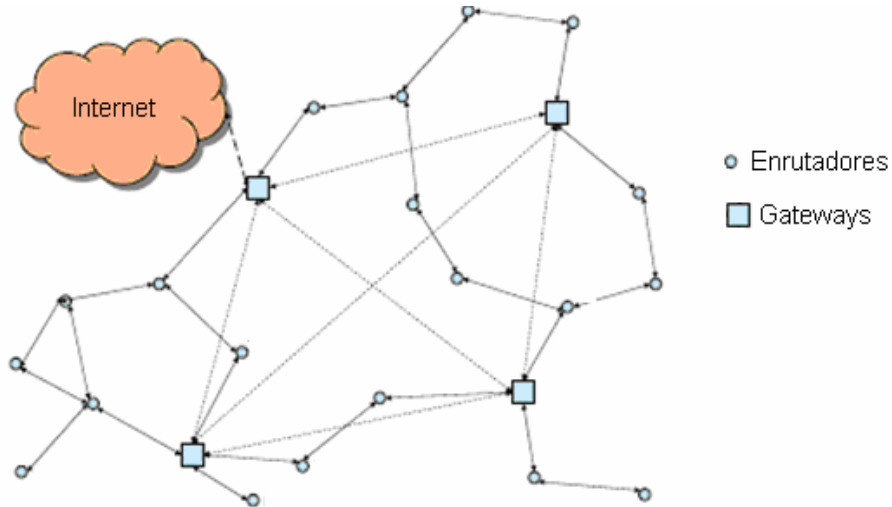


Figura 1-4. Ejemplo de una red inalámbrica en malla

En este tipo de redes, cada nodo inalámbrico puede descubrir a otros nodos, autenticarse y establecer conexiones, y determinar la ruta más efectiva para transmitir una información en particular, además de proporcionar conectividad a los nodos adyacentes. De esta manera, si un enlace falla o un nodo está congestionado, los datos se dirigen al nodo más cercano con menor tráfico, de forma tal que los datos continúan saltando de un nodo a otro por la ruta alterna más óptima, por la cual la información pueda llegar a su destino final. Todo este proceso de auto sincronización y auto regeneración es dinámico, ocurre en un segundo plano y en tiempo real, siendo transparente para el usuario y sin necesidad de intervención humana.

Además, por el hecho de utilizar una mayor cantidad de nodos, la configuración en malla permite alcanzar una mayor cobertura y a la vez salvar obstáculos tales como edificios, montañas y árboles que bloquean la línea de vista, tal como puede observarse en la Figura 1-5 [5]. La instalación es rápida y no requiere de planeaciones complejas para lograr comunicaciones confiables, simplemente moviendo un nodo de la red o añadiendo otro nodo se puede mejorar una señal débil o una zona sin conexión inmediatamente, por lo tanto, se ven muy adecuadas para áreas urbanas densas y en áreas rurales donde los cerros o montañas son un obstáculo para las redes cableadas o inalámbricas convencionales.

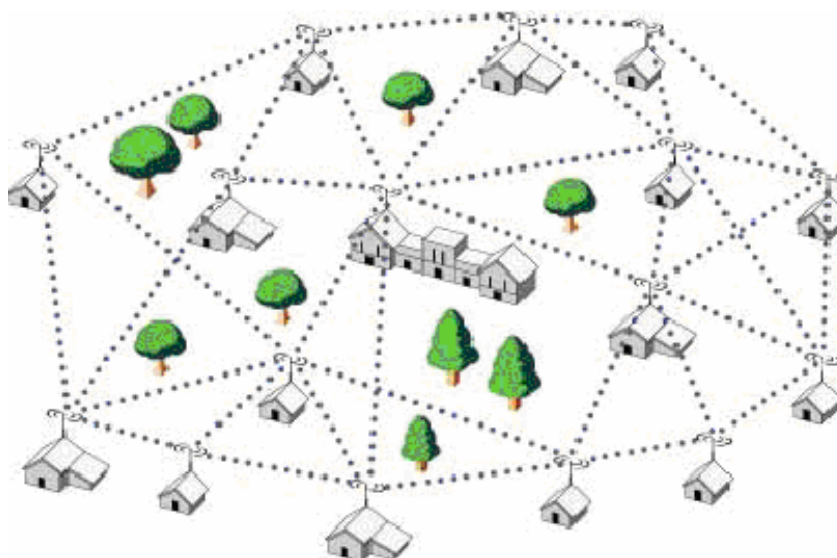


Figura 1-5. Red inalámbrica en malla con obstáculos

En las redes locales inalámbricas convencionales, varios clientes tienen acceso a la red a través de un enlace inalámbrico directo a un punto de acceso, éstas son las redes de un solo salto. Por ejemplo, si un modelo de cliente-servidor se aplica a este tipo de redes, habrá un punto de acceso a través del cual todos los clientes de la zona podrán obtener servicio, tal como se muestra en la Figura 1-6 [5]. Sin embargo, tan pronto como el cliente se aleje y salga del área de cobertura de dicho punto de acceso, se pierde la conexión al servicio, en cambio, las redes en malla acaban con la estructura jerárquica de las actuales conexiones de redes inalámbricas y utilizan un modelo en el cual todos los nodos de la red funcionan como puntos de acceso para dirigir los paquetes a cualquier dispositivo conectado.

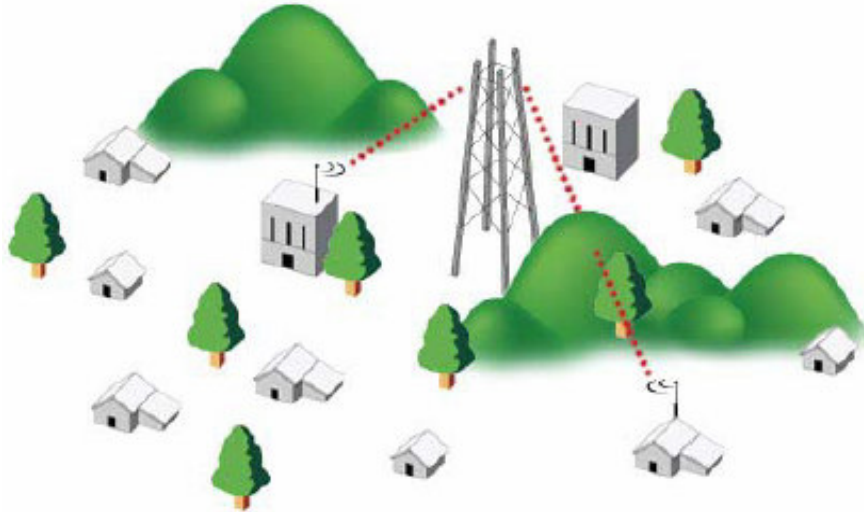


Figura 1-6. Redes inalámbricas tradicionales

1.3 CONFIGURACIONES DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN MALLA

Las redes inalámbricas en malla contienen dos tipos de nodos: los Puntos de Acceso a la Malla (*Mesh Access Point*, MAP) y los clientes de la malla o Estaciones (*Station*, STA). Los primeros tienen movilidad mínima, forman el *backbone* de las WMNs y además, poseen funcionalidades adicionales de *gateway/bridge* que permiten a las WMNs integrarse con varias redes como Internet, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, etc.; los segundos pueden ser clientes convencionales (estáticos o móviles) o equipos con la capacidad de crear una red en malla entre ellos mismos o con los MAPs, y se denominan Puntos de Malla (*Mesh Point*, MP).

Un MAP al igual que un AP convencional puede enviar y recibir mensajes de sus vecinos y a través del proceso de transmisión, los datos encontrarán el camino para llegar al destino pasando a través de MAPs intermedios. Como en Internet y en otras redes basadas en comunicaciones *peer to peer*, una red en malla ofrece múltiples caminos de comunicación a lo largo de la red, por ejemplo, si un enlace falla por alguna razón, la red automáticamente enruta los mensajes a través de caminos alternos, además, para mejorar la flexibilidad de las redes en malla, un MAP usualmente contiene múltiples interfaces inalámbricas construidas sobre tecnologías de igual o diferente acceso inalámbrico.

Comparando un MAP con un AP convencional, un MAP alcanza la misma cobertura con menos potencia de transmisión a través de las comunicaciones de múltiples saltos y contiene funciones adicionales de enrutamiento proporcionadas por las redes en malla. Opcionalmente el protocolo de Control de Acceso al Medio (*Medium Access Control*, MAC) en un MAP puede mejorarse con el fin de solventar las limitaciones de los estándares actuales, como el IEEE 802.11 que se basa en el protocolo de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, CSMA/CA), con serias limitaciones en las redes de múltiples saltos debido a los problemas del nodo oculto y del nodo expuesto [6].

A pesar de las diferencias, entre los APs convencionales y los MAPs, estos últimos generalmente se construyen sobre una plataforma *hardware* similar y también pueden construirse sobre sistemas computarizados dedicados (como por ejemplo, sistemas embebidos) tal como se muestra en la Figura

1-7 [6]. Estos también pueden implementarse sobre computadores portátiles (*laptops*) o computadores de escritorio.



Figura 1-7. Ejemplos de MAPs implementados sobre diferentes sistemas embebidos: (a) Micro Procesador PowerPC y (b) Máquina Risc Avanzada (*Advanced Risc Machine, ARM*)

Los MP también pueden trabajar como enrutadores dentro de la malla, sin embargo, las funciones de *gateway* o *bridge* no existen en este tipo de nodos, generalmente tienen una sola interfaz inalámbrica y sus protocolos de comunicación son más livianos, por lo tanto, la plataforma *hardware* y *software* es mucho más simple que la de los MAP. En comparación con los MAP, los clientes de la malla tienen una alta variedad de dispositivos como por ejemplo: computadores portátiles, computadores de escritorio, Agendas Digitales Personales (*Personal Digital Assistant, PDA*), Teléfonos IP, lectores con Identificación por Radio Frecuencia (*Radio Frequency IDentification, RFID*) y muchos otros dispositivos, como se muestra en la Figura 1-8 [6].



Figura 1-8. Ejemplos de clientes de la malla: (a) Portátil, (b) PDA, (c) Teléfonos IP y (d) Wi-Fi RFID

Como se describirá en las secciones 1.3.1, 1.3.2 y 1.3.3, la configuración de las redes inalámbricas en malla se clasifica en tres grupos principales, de acuerdo a la funcionalidad de los nodos.

1.3.1 Configuración de Infraestructura ó *Backbone*

Este es el tipo de configuración que se utiliza con mayor frecuencia y puede observarse en la Figura 1-9 [6], donde los MAP forman la infraestructura de red para los clientes, las líneas punteadas indican los enlaces inalámbricos y las líneas fijas indican los enlaces cableados. Esta configuración se construye utilizando varios tipos de tecnologías, siendo el estándar IEEE 802.11 la tecnología más utilizada. Entre los MAP se forma una malla auto configurable y auto organizativa que puede conectarse a Internet e integrarse con otras redes inalámbricas existentes a través de la funcionalidad de *gateway/bridge* de los MAPs.

Los clientes convencionales con interfaz *Ethernet* se conectan a los MAPs por medio de enlaces *Ethernet*, por su parte, los clientes convencionales equipados con Tarjetas de Red Inalámbricas (*Network Interface Card*, NIC) de la misma tecnología que los MAP, se conectan directamente. Si las tecnologías son diferentes, los clientes primero deben comunicarse con las estaciones base que dispongan de una conexión *Ethernet* con los MAP, tal como se muestra en la Figura 1-9.

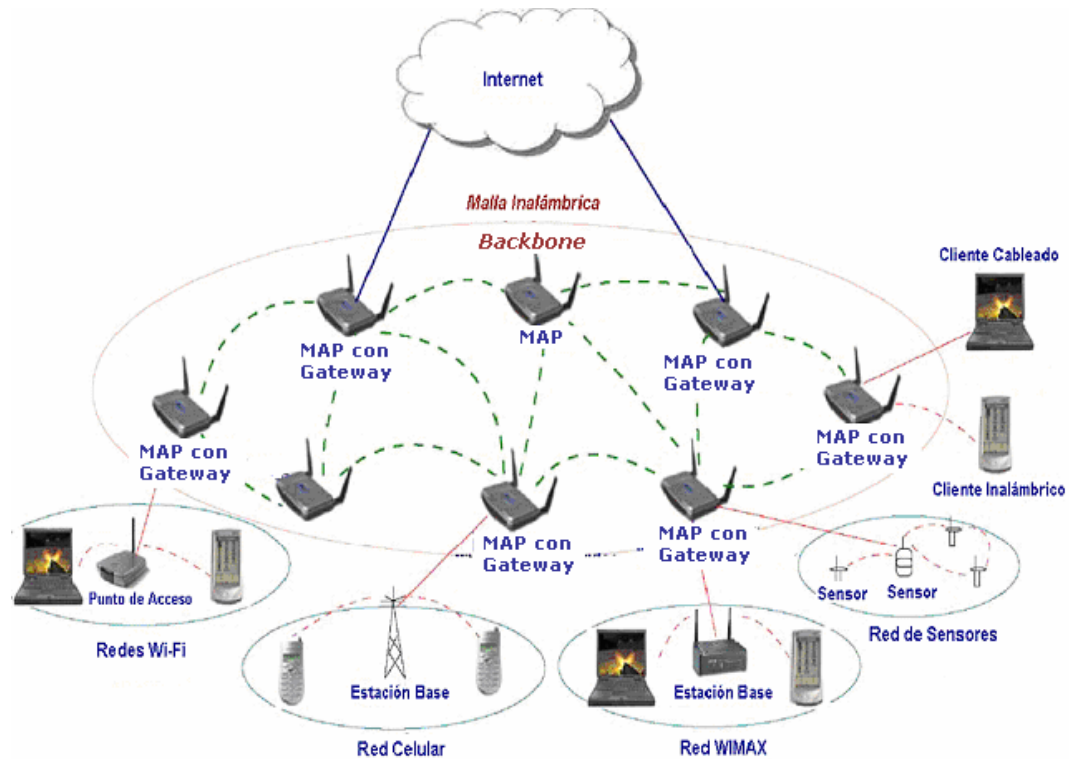


Figura 1-9. Configuración de infraestructura o backbone

1.3.2 Configuración de Cliente WMN

Este tipo de configuración permite crear redes *peer to peer* entre los dispositivos cliente que realizan las funciones de enrutamiento y configuración, además de proporcionar aplicaciones finales para los usuarios, por lo tanto, en este tipo de configuración no se requiere de MAPs, tal como se muestra en la Figura 1-10 [6]. Generalmente esta configuración se forma utilizando un solo tipo de dispositivos, generando prácticamente una red *ad hoc* convencional, sin embargo, los requerimientos de estos dispositivos en una red en malla son mayores debido a que necesitan de funciones adicionales tales como enrutamiento y auto configuración.

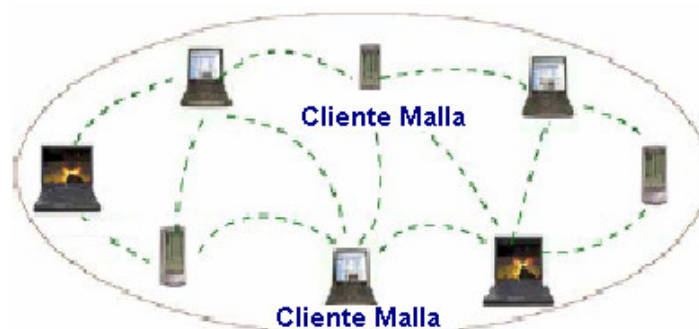


Figura 1-10. Configuración de cliente WMN

1.3.3 Configuración Híbrida de las WMNs

Esta configuración resulta de la combinación de las dos configuraciones anteriores, tal como se muestra en la Figura 1-11 [6]. Aquí, los clientes de la malla acceden directamente a la red a través de los MAP o por medio de otros MPs; mientras que la configuración de infraestructura permite conectividad para otras redes tales como Internet, Wi-Fi, WiMAX, red celular y red de sensores, la capacidad de enrutamiento de los clientes de la malla mejora la conectividad y aumenta el rango de cobertura en las WMN.

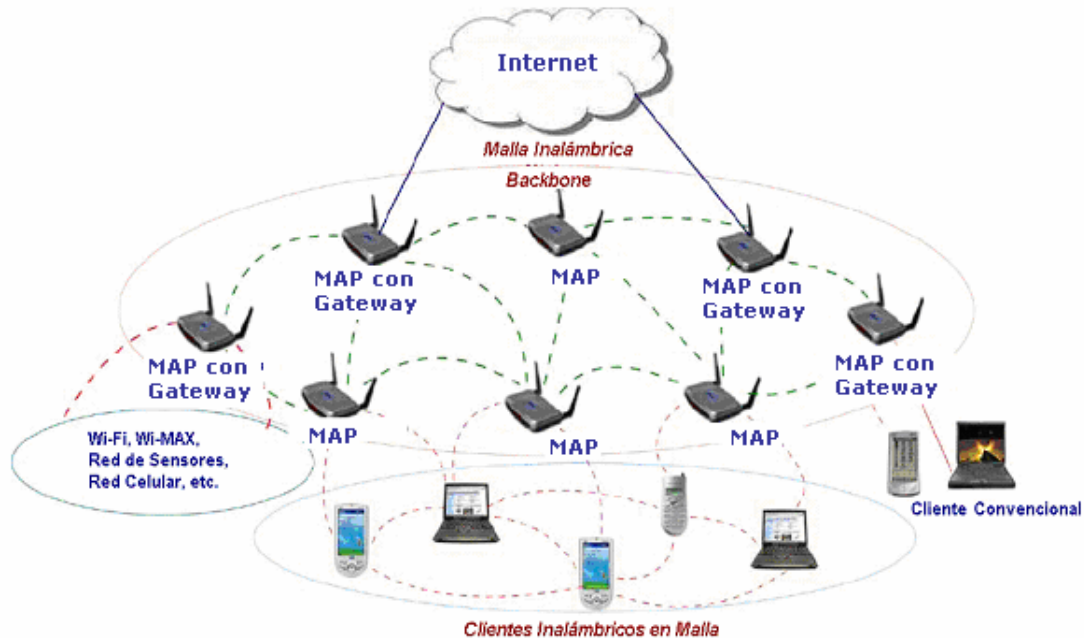


Figura 1-11. Configuración híbrida de las WMNs

1.4 TIPOS DE ARQUITECTURA DE LAS REDES EN MALLA

Las arquitecturas de las redes en malla varían, pero la mayoría tiene sus raíces tecnológicas en el concepto original del Sistema de Distribución Inalámbrico (*Wireless Distribution System, WDS*). WDS permite la interconexión de puntos de acceso de manera inalámbrica, por lo tanto, un punto de acceso puede funcionar sólo como punto de acceso, o bien como puente con otro punto de acceso, o desempeñar ambas funciones.

De esta manera es posible crear una gran red inalámbrica dado que cada punto de acceso se conecta a cualquier otro punto de acceso disponible (que utilice WDS) y a cada punto de acceso se pueden conectar (de forma cableada o inalámbrica) la cantidad máxima que soporte el equipo. En las redes en malla el tráfico debe viajar a través de varios nodos antes de terminar la red. El número de saltos que el tráfico debe pasar para alcanzar su destino dependerá del diseño de la red, la longitud de los enlaces, la tecnología utilizada y otras variables. A continuación se describe los modelos de arquitectura de las redes en malla.

1.4.1 Modelo de Única Frecuencia

El modelo de única frecuencia es la arquitectura más débil para las redes inalámbricas en malla. En este tipo de arquitectura se utiliza una sola frecuencia sobre un único canal en el nodo o MAP, la cual se comparte por los clientes inalámbricos y por el tráfico de *backhaul*³ (que se envía entre dos MAPs), como se muestra en la Figura 1-12 [7]. Aquí todos los nodos trabajan en la misma frecuencia y por lo tanto también comparten el ancho de banda disponible. Cuando más nodos se adicionan a la red, un alto porcentaje del ancho de banda se dedica a enviar tráfico de *backhaul*, lo que hace que la

³ Parte de una red de comunicaciones que conecta a otras redes y que transporta tráfico pesado.

capacidad del sistema sea muy baja. Este fenómeno se da, debido al simple hecho de que el medio inalámbrico se comparte por todos los nodos.

En esta configuración, un MAP no puede enviar y recibir información al mismo tiempo o enviar información cuando otro MAP dentro del mismo rango de transmisión esté enviando datos, introduciendo latencias intolerables, exactamente después de 3 saltos [8]. Esta situación de compartir el ancho de banda disponible entre todos los equipos de la red es consecuencia del uso de CSMA/CA como protocolo de acceso.

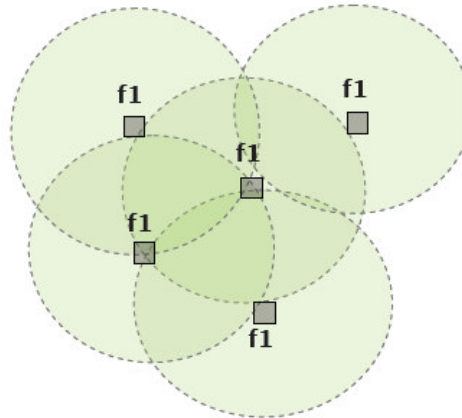


Figura 1-12. Única frecuencia, todo sobre el mismo canal

1.4.2 Modelo de Doble Frecuencia

En este tipo de arquitectura cada nodo tiene dos interfaces con frecuencias diferentes, donde una se dedica a soportar los clientes inalámbricos, mientras que la otra se dedica a soportar el tráfico de *backhaul*, como se muestra en la Figura 1-13 [7]. De esta manera, se mejora la capacidad del sistema, se aumenta el *throughput*⁴ y se disminuye la latencia debido a que el acceso a los clientes inalámbricos y al *backhaul* se hace a través de canales separados.

Comparando esta arquitectura con la arquitectura de un solo canal, con esta se resuelve el problema de transporte y se proporciona un mejor desempeño en la red. Sin embargo, si esta arquitectura se implementa para manejar altos porcentajes de tráfico, el desempeño de la red mejoraría muy poco debido a que el canal de *backhaul* se compartiría para la entrada y salida de tráfico y esto generaría un cuello de botella.

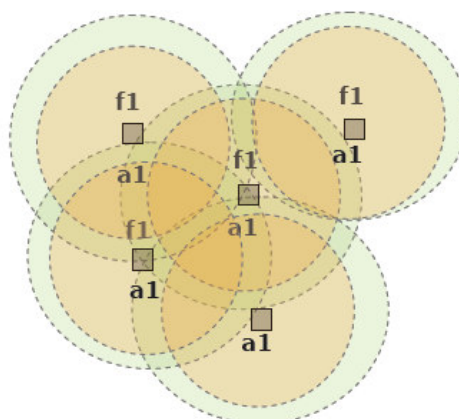


Figura 1-13. Doble frecuencia (doble canal), compartiendo el *backhaul*

⁴ Cantidad de datos transmitidos que contienen información útil y no redundante.

1.4.3 Modelo de Múltiples Frecuencias y Múltiples Interfaces

En esta arquitectura cada nodo de la red tiene como mínimo tres interfaces con frecuencias diferentes, una frecuencia para el tráfico de los clientes inalámbricos, otra para el ingreso del tráfico de *backhaul* y una tercera para la salida del tráfico de *backhaul*, como se muestra en la Figura 1-14 [7].

Con respecto a las dos arquitecturas anteriores, este tipo de arquitectura ofrece un mejor desempeño para las redes inalámbricas en malla cuando se manejan grandes cantidades de tráfico, debido a que los clientes inalámbricos, la entrada y salida al *backhaul* transmiten y reciben datos simultáneamente, pues cada enlace tiene un canal por separado.

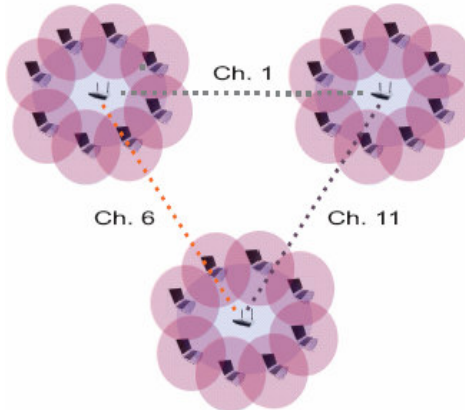


Figura 1-14. Múltiples frecuencias, enlaces separados para ingreso y salida de *backhaul*

1.5 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LAS REDES EN MALLA

Las redes en malla poseen ventajas clave por encima de las redes convencionales, ya que aportan robustez, fiabilidad y facilidad de mantenimiento, también obtienen una mejor flexibilidad, pues los nodos normalmente contienen múltiples interfaces que pueden ser de diferentes tecnologías de acceso inalámbricas. Para entender sus beneficios, en los siguientes apartados se muestran dichas ventajas a través de la comparación con las redes de un solo salto.

1.5.1 Robustez

Las redes en malla son más robustas que las redes de un solo salto debido a que no dependen del desempeño de un solo nodo para su operación. En las redes de un solo salto, si el único AP está fuera de servicio, también lo está la red, mientras que en la arquitectura de red en malla, si el MAP más cercano está fuera de servicio o existe interferencia local o atenuación, la red continúa operando pues simplemente se dirigen los datos a través de una ruta alterna creando un sistema de auto reconfiguración, lo cual proporciona redundancia, estabilidad y confiabilidad a la red, esta característica se muestra en la Figura 1-15.

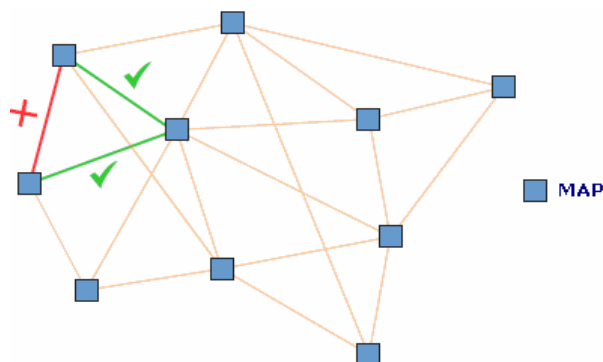


Figura 1-15. Robustez

1.5.2 Ancho de Banda Superior

Para las comunicaciones inalámbricas se sabe que el ancho de banda aumenta a medida que la distancia disminuye, debido a que la interferencia y otros factores contribuyen a la pérdida de datos en largas distancias. Por lo tanto, una forma de obtener un mayor ancho de banda eficaz de la red es la conexión a distintos puntos de acceso en lugar de a uno sólo y la transmisión de datos a través de varios saltos cortos tal como aparece en la Figura 1-15 [8]. Para lograr esto, cada nodo incluye un equipo de comunicaciones y actúa como un punto de repetición para llegar a nodos más distantes.

1.5.3 Capacidad para Volver a Emplear el Espacio

Éste es otro beneficio de las redes en malla en comparación con las redes de un solo salto, ya que como se mencionó anteriormente, en las redes de un solo salto, los dispositivos deben compartir un AP. Si varios dispositivos intentan el acceso a la red a la vez, se produce un congestionamiento de tráfico virtual que reduce la velocidad del sistema; de forma opuesta, en las redes de varios saltos, pueden conectarse a la red varios dispositivos al mismo tiempo, a través de distintos nodos, sin degradar necesariamente el desempeño del sistema. Los rangos de transmisión más cortos de la red en malla limitan la interferencia y permiten el flujo de datos simultáneo y separado.

1.5.4 Escalabilidad

Una malla es también escalable y puede manejar cientos o miles de nodos, debido a que la operación de la red no depende de un punto central de control y por lo tanto, la adición de múltiples conjuntos de puntos de datos o pasarelas es muy factible.

Es claro que la confiabilidad, adaptabilidad y escalabilidad son algunos de los atributos más importantes de una red inalámbrica. Haciendo una comparación entre los diferentes tipos de redes, las redes punto a punto pueden proveer confiabilidad, pero no son escalables o manejables a más de un par de puntos o en los puntos finales y las redes punto a multipunto pueden manejar más puntos finales, pero su confiabilidad se determina por la ubicación de los puntos de acceso y los puntos finales. Si las condiciones del ambiente entregan poca confiabilidad, es difícil o casi imposible adaptar una red punto a multipunto para incrementar la confiabilidad. En contraste, las redes en malla son inherentemente confiables, se adaptan fácilmente a ambientes o arquitecturas restringidas, y pueden escalar para manejar miles de puntos finales. Estos atributos se resumen en la Tabla 1-1.

TABLA 1-1. COMPARACIÓN ENTRE LAS TOPOLOGÍAS DE RED

Topología	Confiabilidad	Adaptabilidad	Escalabilidad
Punto a punto	Alta	Baja	Ninguna (2 puntos finales)
Punto a multipunto	Baja	Baja	Moderada (7-30 puntos finales)
Redes en malla	Alta	Alta	Si (Miles de puntos finales)

1.5.5 Facilidad de Integración y Simplicidad

El *hardware* de la malla es generalmente una pequeña caja negra que puede integrarse bastante bien a otras redes en ambientes externos (*outdoor*) así como también en ambientes internos (*indoor*).

Si se va a adicionar a una red inalámbrica que utiliza estándares como 802.11a/b/g, la configuración de la red en malla es bastante simple puesto que las rutas se configuran dinámicamente y el nuevo segmento de red simplemente se coloca dentro de la red para poder tomar cualquiera de las antenas disponibles y alcanzar uno o más nodos vecinos. Además, las redes en malla pueden adaptarse fácilmente a los cambios en la topología de la red tales como la adición o eliminación de nodos o el cambio de la ubicación de un nodo.

1.5.6 Compatibilidad e Interoperabilidad con Redes Inalámbricas Existentes

Las WMNs pueden integrarse con otras redes a través de los MAP con *gateways*, incluyendo redes cableadas e inalámbricas, así, múltiples tipos de redes acceden a las WMNs tales como WiMAX, redes de sensores, redes celulares, etc.

1.5.7 Red de Múltiples Saltos

Un objetivo al desarrollar las WMNs es extender el rango de cobertura de las redes inalámbricas convencionales sin sacrificar la capacidad del canal y proporcionar conectividad entre usuarios que tengan enlaces Sin Línea de Vista (*Non Line of Sight*, NLOS) directa. Para lograr este objetivo, el diseño en malla con múltiples saltos es indispensable, con lo cual se obtiene un alto *throughput* a través de saltos cortos, menor interferencia entre los nodos y mayor eficiencia reutilizando la frecuencia.

Si bien es cierto que un enlace con múltiples saltos puede introducir algunas pérdidas por el salto de la señal de un nodo a otro, esta pérdida se compensa con el incremento del *throughput* total efectivo de la comunicación, generado por el aumento de velocidad que se da en cada nodo debido a la utilización de varios saltos cortos. Por ejemplo, si se implementa una red inalámbrica en malla con el estándar IEEE 802.11g que a distancias cortas permite alcanzar velocidades reales de aproximadamente de 24 Mbps, la velocidad total de la red se incrementará gracias al aporte de velocidad que cada salto introduce y aunque pueden presentarse algunas pérdidas en los trayectos, el desempeño de la red será mucho mejor que el producido por una red con un único salto de 24 Mbps sobre el cual se tiene que llevar todo el tráfico y afrontar las pérdidas producidas por la propagación.

1.5.8 Consumo de Energía

Los nodos de la red en malla (exceptuando aquellos nodos que mantienen la conexión con Internet) pueden construirse con requerimientos de energía sumamente baja, lo cual significa que pueden desarrollarse como unidades completamente autónomas alimentadas perfectamente con energía solar, de viento o hídrica.

En resumen, las ventajas de la topología en malla incluyen servicios más económicos, mayor área de cobertura, disminución del tráfico, reducción de costos de mantenimiento y del tiempo de instalación a largo plazo. Una red inalámbrica en malla robusta, de banda ancha y auto configurable permite el acceso a más usuarios con mayores capacidades.

1.6 DIFERENCIAS ENTRE LAS REDES AD HOC Y LAS REDES EN MALLA

Por sus características, las WMNs se suelen considerar como un tipo de redes *ad hoc* debido a la ausencia de infraestructura cableada. A pesar de que se necesitan técnicas de interconexión *ad hoc*, las capacidades adicionales requieren algoritmos y principios de diseño más sofisticados para el despliegue de una WMN. Más específicamente, en lugar de ser un tipo de redes *ad hoc*, las WMNs tienen como propósito diversificar sus capacidades, por consiguiente, las redes *ad hoc* actualmente pueden considerarse como un subconjunto de las WMNs. Para ilustrar este punto, las diferencias entre las WMNs y las redes *ad hoc* se describen a continuación.

1.6.1 Infraestructura ó Backbone Inalámbrico

Como se mencionó anteriormente, las WMNs consisten en un *backbone* inalámbrico con MAP. El *backbone* inalámbrico proporciona gran cobertura, conectividad y un robusto dominio inalámbrico, sin embargo, la conectividad en redes *ad hoc* depende de la contribución individual del usuario final, lo cual no resulta muy confiable.

1.6.2 Integración

Una WMN soporta clientes convencionales que utilizan las mismas tecnologías radio que un MAP. Esto se logra a través de la función de *host-routing* disponible en este tipo de enrutadores, además, permite

la integración de varias redes existentes, tales como Wi-Fi, Internet, red celular y red de sensores, a través de las funcionalidades de *gateway/bridge*. Por consiguiente, se proporcionan servicios a usuarios en otras redes por medio del uso de la infraestructura inalámbrica, en cambio, en las redes *ad hoc* la integración con otro tipo de redes no es posible, obteniendo como resultado una red con un alcance menor y un ancho de banda más limitado.

1.6.3 Configuración y Enrutamiento Dedicado

En redes *ad hoc*, los dispositivos de usuario final desempeñan funcionalidades de configuración y enrutamiento para todos los nodos, sin embargo, las WMNs contienen los MAPs para estas funcionalidades, por lo tanto, la carga en los dispositivos de usuario disminuye significativamente, lo cual proporciona un menor consumo de energía y altas capacidades para una posible movilidad.

1.6.4 Múltiples Interfaces

Como se mencionó anteriormente, los MAPs pueden contener múltiples interfaces de radio para desempeñar funcionalidades de enrutamiento y acceso. Esto permite la separación de los tipos de tráfico principales en el dominio inalámbrico, pues mientras el enrutamiento y la configuración se realizan en los MAPs, el acceso a la red de los usuarios se realiza con una interfaz de radio diferente, y de esta manera se mejora la capacidad de la red significativamente. Por otro lado, en las redes *ad hoc*, estas funcionalidades se realizan en el mismo canal, y como resultado, el rendimiento disminuye.

En general, las WMNs solucionan las limitaciones y mejoran el rendimiento de las redes *ad hoc*, ya que extienden sus capacidades.

1.7 APLICACIONES

El conjunto de aplicaciones de las WMNs es muy diverso, cubriendo desde redes pequeñas y estáticas, hasta redes grandes de gran potencia y muy dinámicas, lo cual demuestra claramente el mercado prometedor. Al mismo tiempo estas aplicaciones no pueden soportarse por otro tipo de redes inalámbricas, como la red celular, redes *ad hoc*, redes sensores, IEEE 802.11 etc. Algunos ejemplos de posibles aplicaciones de redes inalámbricas en malla son los siguientes.

1.7.1 Redes Domésticas

Uno de los usos prometedores de las redes en malla son las redes domésticas inalámbricas. El beneficio principal de la malla en este entorno es la capacidad para admitir aplicaciones con gran ancho de banda, tal como el vídeo de alta definición. Las redes en malla inalámbricas domésticas pueden enlazar computadores de escritorio, equipos portátiles y de bolsillo, Televisión de Alta Definición (*High Definition Television, HDTV*), reproductores de Discos Versátiles Digitales (*Digital Versatile Disc, DVD*), consolas de juego, cámaras de vídeo y otros dispositivos electrónicos para consumidores, sin necesidad de instalar cables o puntos de red, o de configurar dispositivos. Un ejemplo de este tipo de redes se muestra en la Figura 1-16 [6].



Figura 1-16. Red inalámbrica en malla doméstica

1.7.2 Redes Residenciales

El acceso de los usuarios a redes de banda ancha, orientadas a la transmisión de datos, se ha vuelto una necesidad apremiante para las empresas de telecomunicaciones. Diversas modalidades de acceso como Híbrido de Fibra y Coaxial (*Hybrid Fiber/Coaxial*, HFC) y Línea Digital de Abonado (*Digital Subscriber Line*, DSL) basadas en redes fijas cableadas, son una solución válida en las zonas donde estas redes tienen cobertura. Sin embargo, en las regiones apartadas como las de un entorno rural que no cuentan con esta infraestructura de comunicación, las redes en malla son una gran alternativa. Un ejemplo de este tipo de redes puede observarse en la Figura 1-17 [6].



Figura 1-17. Red inalámbrica en malla residencial

1.7.3 Sistema Médico y de Salud

En un hospital o en un centro médico, el diagnóstico y monitoreo de datos necesitan procesarse y transmitirse desde un cuarto para varios propósitos. La transmisión de datos generalmente requiere de un gran ancho de banda, ya que la alta resolución de las imágenes médicas y varias informaciones periódicas fácilmente pueden producir un volumen de datos alto y constante. Las redes cableadas tradicionales sólo proporcionan acceso a la red para ciertos dispositivos médicos mientras que las redes basadas en Wi-Fi necesitan de la existencia de conexiones *Ethernet*, las cuales causan un sistema de alto costo y complejo pero sin habilidades para eliminar sitios aislados, sin embargo, estos inconvenientes no existen con las WMNs.

1.7.4 Sistema de Seguridad y Vigilancia

Como la seguridad se ha vuelto una preocupación constante, los sistemas de vigilancia cada vez son más necesarios en empresas, centros comerciales, supermercados, etc. Las WMNs son una solución más viable que las redes cableadas para conectar todos los dispositivos. Dado que las imágenes y videos son el mayor tráfico en una red, esta aplicación demanda mucha más capacidad que otras aplicaciones.

1.7.5 Red de Sensores

Esta aplicación corresponde a una red extensa compuesta por elementos de bajo costo que se encargan de medir alguna variable del entorno como temperatura, presión, humedad o cualquier otra y transmitirla a través de una red de nodos cercanos hasta un destino donde se procesa la información. La principal característica es que no requiere una fuente de alimentación de alta

capacidad puesto que los enlaces cercanos permiten una comunicación con una poca potencia de transmisión.

1.7.6 Redes de Área Metropolitana

Las WMNs aplicadas en área metropolitana tienen varias ventajas, una de las más importantes es la velocidad de transmisión que tiene un nodo en la capa física pues ésta es mucho más alta en comparación con las redes celulares, por ejemplo, un nodo de la tecnología IEEE 802.11g puede transmitir hasta una velocidad de 54 Mbps. Por otro lado, las WMNs son una alternativa más económica para el acceso de banda ancha comparado con la solución que ofrecen las redes cableadas u ópticas, lo cual puede ser provechoso en regiones apartadas tales como las de un ambiente rural.

Las redes inalámbricas en malla para Redes de Área Metropolitana (*Metropolitan Area Network, MAN*) cubren una área mucho más grande que las redes domésticas o empresariales, tal como se ve en la Figura 1-18 [6]. Por esta razón, el requisito de escalabilidad para la red inalámbrica en malla MAN es mucho más alto que para otras aplicaciones.

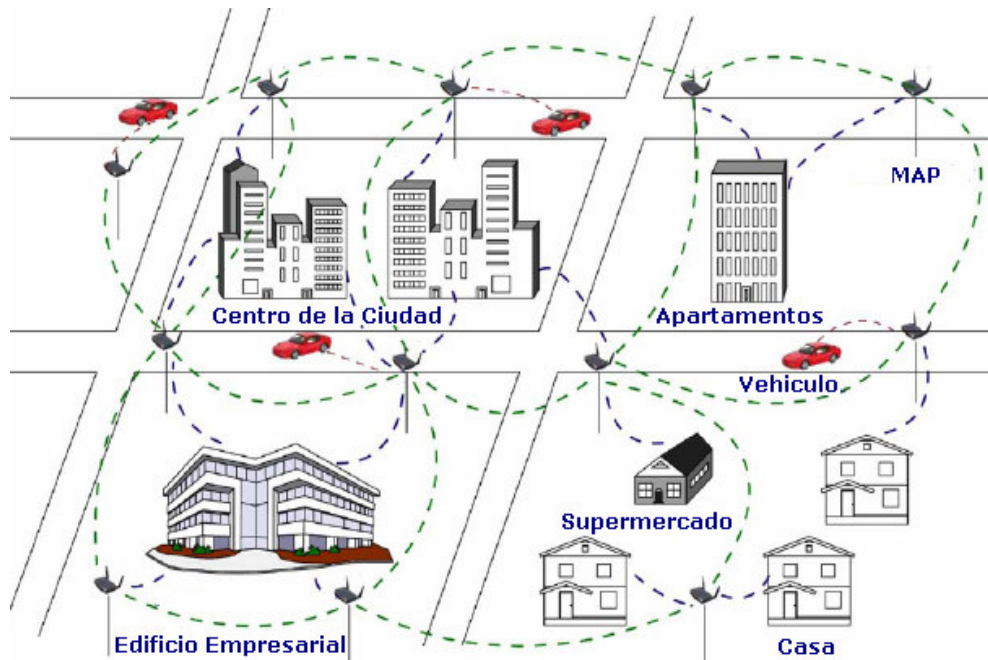


Figura 1-18. Red inalámbrica en malla para MAN

1.7.7 Automatización de Edificios

En una construcción, varios dispositivos eléctricos tales como, fuentes de potencia, luces, elevadores, aire acondicionado, etc., necesitan controlarse y monitorearse. Actualmente esta labor se lleva a cabo a través de estándares de redes cableadas, lo cual es muy costoso debido a su complejidad en la implementación y mantenimiento. Aunque algunas redes basadas en Wi-Fi pueden utilizarse para reducir los costos, todavía no alcanzan un desempeño satisfactorio, pues requieren de conexiones *Ethernet* entre los dispositivos, que aumentan el precio de la implementación final. Si los puntos de acceso para Redes de Control y Automatización de Edificios (*Building Automation and Control networks, BACnet*) se reemplazan por MAP, como se muestra en la Figura 1-19 [6], el costo de la implementación se reduce significativamente, siendo mucho más simple el proceso de implementación debido a la conectividad en malla entre los equipos inalámbricos.

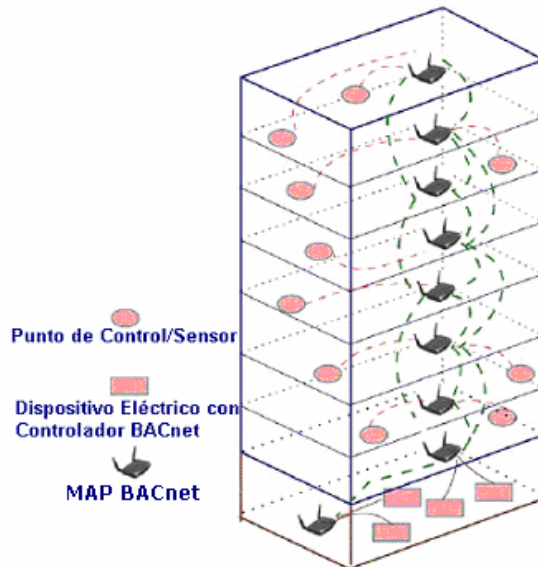


Figura 1-19. WMN para automatización de edificios

1.7.8 Redes Empresariales

Las redes inalámbricas en malla para entornos empresariales crecen fácilmente y se extienden al tamaño de las empresas, por ende, existen redes pequeñas que se instalan dentro de una oficina, redes medianas que interconectan varias oficinas dentro de un mismo edificio y redes de gran tamaño que se instalan en oficinas ubicadas en varios edificios, tal como aparece en la Figura 1-20 [6]. La instalación de redes inalámbricas en malla para entornos empresariales es más complicada que para entornos domésticos debido a que se maneja mayor cantidad de nodos y la topología de red es más compleja. Sin embargo, el modelo de servicio para redes empresariales puede aplicarse a muchos lugares tales como los aeropuertos, hoteles, centros comerciales, centros de convenciones, centros deportivos, etc.

Estas redes también permiten que los usuarios compartan el ancho de banda, distribuyen de manera más eficaz el tráfico de la red y eliminan los cuellos de botella que se producen en las redes de un solo salto, mejorando así su desempeño ya que la adición de más nodos amplía el rango y la cobertura de la red sin incurrir en altos costos para añadir más cables.

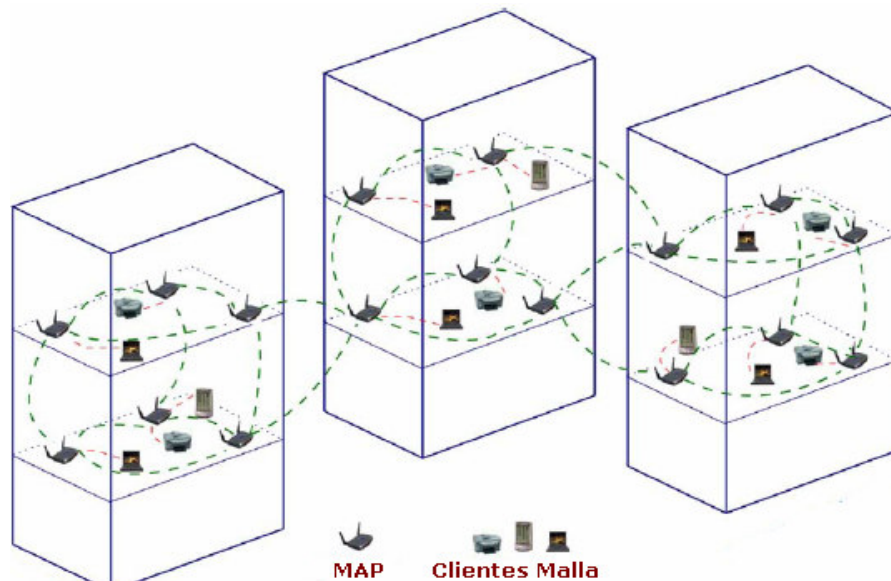


Figura 1-20. Red en malla empresarial

1.7.9 Conexión a un Proveedor de Servicios de Internet (*Internet Service Provider, ISP*) a través de Banda Ancha

Las redes en malla se pueden utilizar para ampliar la banda ancha inalámbrica, debido a que la malla no requiere una Línea de Vista (*Line Of Sight, LOS*) directa entre todos sus nodos. La señal inalámbrica puede transmitirse a través de la antena receptora de un usuario que tiene una línea de vista directa a la torre y a continuación dirigirse al usuario final que no tiene dicha vista, así, la señal salta de una antena a otra, en busca de la mejor ruta para el cliente que no tiene una vista directa. A partir de este proceso un cliente con LOS puede proveer acceso de banda ancha inalámbrica a varios vecinos cuyas líneas de vista a la torre están opacas, y por consiguiente, ampliar el rango de cobertura de la red.

1.8 ALGORITMOS DE ENRUTAMIENTO

Una vez se conocen las bases generales de las redes inalámbricas en malla es importante estudiar los protocolos de enrutamiento más representativos para este tipo de redes. Con este fin, a continuación se describirán las generalidades de los protocolos, seguidamente se realizará una clasificación general de ellos y finalmente se analizará en detalle el funcionamiento de los protocolos convenientes para este proyecto en particular.

1.8.1 Generalidades

Los algoritmos de enrutamiento se diseñan para transmitir la información de un terminal a otro a través de múltiples saltos intermedios. Los saltos intermedios pueden especificarse en forma fija, con lo cual la ruta establecida no varía en el tiempo y se conoce por los enrutadores para poder transmitir la información, o de forma dinámica, cuando los saltos intermedios no se conocen y pueden cambiar en el tiempo. El primer proceso de transmisión se conoce como enrutamiento estático y el segundo como enrutamiento dinámico.

El proceso de enrutamiento se desarrolla por medio de enlaces punto a punto entre terminales llamados enrutadores, los cuales tienen la función de recibir la información y determinar el siguiente salto que deben seguir los datos para llegar al destino. La decisión se basa en listas llamadas tablas de enrutamiento, las cuales contienen información general de las rutas e información específica de cada algoritmo de enrutamiento. La información contenida en una tabla de enrutamiento por lo menos consiste en la dirección del siguiente salto que debe tomarse para poder llegar a determinado destino. Otra información permite determinar el estado de la ruta y algunas métricas o medidas para determinar la eficacia de la ruta elegida.

1.8.2 Clasificación de los Protocolos

Los protocolos de enrutamiento se pueden clasificar según varios criterios, pero la división más común para las redes inalámbricas en malla consiste en distinguir entre protocolos proactivos y reactivos [9].

Los protocolos proactivos intercambian periódicamente mensajes de control entre los nodos. De esta forma consiguen tener rutas frescas hacia cada nodo de la red. Tienen la ventaja de reaccionar rápidamente ante cambios en la topología, lo que les lleva a detectar las rupturas de los enlaces y aparición de otros nuevos. Gracias a eso pueden elegir la mejor ruta en cada instante, claro está, dependiendo siempre de la frecuencia con la que intercambien la información. Cuanto más frecuente sea el intercambio de mensajes de control más frescas serán las rutas, pero también se incurrirá en una mayor sobrecarga por parte del protocolo. Esto resta ancho de banda al tráfico de aplicación, que es el realmente útil. Los protocolos proactivos propuestos actualmente por el Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet (*Internet Engineering Task Force, IETF*) para las Redes Móviles *Ad Hoc* (*Mobile Ad Hoc Network, MANET*) son: el Algoritmo de Enrutamiento por Optimización de Estado del Enlace (*Optimized Link State Routing Algorithm, OLSR*) [10] y el algoritmo de Difusión de la Topología Basada en el Reenvío de la Ruta Inversa (*Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding, TBRPF*) [11].

Por otra parte, debido a las limitaciones de las redes, en cuanto al ancho de banda, surgen los protocolos reactivos o bajo demanda para evitar que éste se malgaste en tráfico de control. Este tipo de protocolos no intercambian información periódicamente y sólo mantienen rutas con los destinos de

las comunicaciones activas, minimizando el número de mensajes que necesita el protocolo. Cuando un nodo quiere comunicarse con otro de la malla, inicia un proceso que se conoce como descubrimiento de ruta, el cual consiste en transmitir un mensaje de control para solicitar la ruta hacia un destino (*Route Request*, RREQ); si esta solicitud es exitosa, el nodo solicitante recibirá una respuesta (*Route Reply*, RREP) que incluye dicha ruta (implícita o explícitamente). El principal inconveniente de este tipo de protocolos es la latencia que tienen para iniciar las comunicaciones. Además, reaccionan con menos velocidad ante cambios topológicos que los protocolos proactivos. Los protocolos reactivos propuestos actualmente por el grupo de trabajo MANET del IETF es el protocolo de Vector Distancia *Ad hoc* sobre Demanda (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*, AODV) [12] y el algoritmo de Enrutamiento de Fuente Dinámico (*Dynamic Source Routing*, DSR) [13].

Sin embargo, es importante aclarar que los protocolos mencionados anteriormente trabajan bien en las WMN móviles, es decir, cuando sus nodos son estaciones móviles y la topología de la red cambia continuamente, y por lo tanto tienen funcionalidades de enrutamiento a nivel 3. No obstante, para el caso de las WMNs fijas (las cuales no tienen movilidad y sus rutas varían con menor frecuencia) este tipo de protocolos no son los más adecuados ya que estas redes están compuestas por MAPs y estaciones cliente, los cuales son dispositivos de nivel 2, incapaces de decodificar el paquete IP; por esta razón, también se implementan protocolos de enrutamiento de nivel 2.

Dado que este proyecto de grado se enfoca hacia el estudio de las WMNs fijas, en la sección 1.8.3 se explicarán con más detalle los protocolos de enrutamiento a nivel 2.

1.8.3 Principales Algoritmos de Enrutamiento para Redes en Malla Fijas

Como se mencionó anteriormente, los protocolos de enrutamiento propuestos por las MANET se implementan en el nivel 3 (nivel de red) del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (*Open Systems Interconnection*, OSI), sin embargo, también se implementan protocolos de enrutamiento a nivel 2 (nivel de enlace de datos) específicamente para las WMN fijas.

Estos nuevos protocolos toman conceptos del enrutamiento a nivel 3 y determinan sus rutas de la siguiente manera: teniendo la dirección IP destino hacia donde se enviarán los datos, la estación fuente obtiene la dirección MAC del destino a través del Protocolo para Resolución de Direcciones (*Address Resolution Protocol*, ARP), luego comprueba en su tabla de enrutamiento a nivel MAC para verificar que la ruta existe o si necesita crearse. Si la ruta se conoce, las tramas de datos se dirigen de acuerdo con la ruta hacia el próximo salto, de lo contrario se crea una ruta nueva para este destino.

A continuación se describen algunos de los protocolos de enrutamiento para WMNs fijas más importantes.

1.8.3.1 Protocolo Híbrido de Malla Inalámbrica (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*, HWMP)

El protocolo HWMP combina la flexibilidad del descubrimiento de rutas por demanda con extensiones que permiten un enrutamiento proactivo eficiente para los portales de la malla, adicionalmente, por su naturaleza híbrida permite una selección del trayecto flexible que se adapta fácilmente a despliegues de redes en malla independientes con configuración de infraestructura o *ad hoc* [14].

HWMP combina capacidades de enrutamiento por demanda con capacidades de enrutamiento proactivo, con lo cual se logra que los MAPs puedan realizar un descubrimiento y mantenimiento óptimo de las rutas por sí mismos o formen una estructura de árbol basada en un nodo raíz que rápidamente establece los trayectos hacia los nodos. En ambos casos, la selección del nodo vecino se realiza basándose en una métrica predefinida. HWMP utiliza un solo conjunto de primitivas y reglas tomadas del protocolo AODV para todas las funciones relacionadas con el enrutamiento.

Si una malla no configura un nodo raíz, todo el enrutamiento se realizará con el descubrimiento por demanda, de lo contrario, el nodo que se configura como raíz puede utilizarse para identificar un trayecto desde cualquier nodo de la malla hacia el nodo raíz.

La estructura de red en árbol le permitirá al MAP o a un MAP con capacidad de *gateway/bridge* configurarse como raíz; en este caso, los otros MAPs mantendrán proactivamente las rutas hacia el nodo raíz y se creará y mantendrá un vector de distancia de enrutamiento en el árbol. Cada nodo

también puede establecer rutas a otros nodos utilizando las reglas y primitivas del protocolo AODV. Algunos de los principales beneficios del protocolo HWMP son los siguientes:

- Flexibilidad para adaptarse a los requerimientos de varios escenarios incluyendo redes en malla fijas y móviles.
- Los MAPs se descubren y utilizan el mejor trayecto determinado por la métrica, para cualquier destino en la malla con una complejidad muy baja.
- Adicionalmente, cuando un nodo se configura como raíz en la malla:
 - La inundación de paquetes para el descubrimiento de las rutas en la malla se reduce si el destino está fuera de la malla.
 - Se reduce la necesidad de almacenar los mensajes en la fuente mientras se realiza el descubrimiento de la ruta por demanda.
 - El tráfico *broadcast*⁵ que no se utiliza para el descubrimiento también puede transmitirse en la topología de árbol.

1.8.3.2 Protocolo de enrutamiento a nivel MAC "inteligente" para redes inalámbricas en malla

Este es un protocolo propuesto por el Departamento de Ciencia y Computación de la Universidad de California, en los Ángeles Estados Unidos, que mejora la capacidad de las redes implementando un algoritmo de enrutamiento a nivel MAC y arreglos de antenas direccionales en el nivel físico para la comunicación entre los MAPs de la red inalámbrica en malla [15].

• Funcionamiento

Cada nodo de la red contiene una tabla de enrutamiento con la información de todos los nodos vecinos que se encuentran a un solo salto, a través de los cuales le es posible alcanzar un camino específico. Un nodo averigua quiénes son sus vecinos enviando mensajes de saludo *Hello* cuando inicia, mientras que otro nodo de la red se elige como enrutador designado y tiene la responsabilidad de intercambiar información de las rutas con los otros nodos de la red que se consideran nodos adyacentes a él, de esta manera, los nodos no intercambian información con todos los vecinos, sino solamente con el nodo designado.

Periódicamente los nodos transmiten la información de sus tablas de enrutamiento a todos los demás nodos de la red para alcanzar su destino a través de múltiples saltos. Cada nodo inunda la red con mensajes de actualización de estado del enlace, indicando su propio estado y los costos de los enlaces contenidos en su base de datos topológica; estos mensajes utilizan el número de identificación del paquete antes de enviarlo para saber si aportan información nueva y evitar el problema de conteo infinito. Los nodos envían mensajes cuando cambian los costos o cuando se cae o se levanta un enlace. Los mensajes de descripción de la base de datos informan todos los números de secuencia de las entradas disponibles en el emisor y permiten al receptor saber quién tiene la información más reciente.

Cualquier nodo puede pedir información de estado del enlace a sus nodos vecinos emitiendo mensajes de solicitud del estado del enlace. Cada nodo verifica quién tiene la información más reciente y la difunde.

Cuando un nodo selecciona el próximo salto para enviar un paquete y este salto está ocupado o el enlace está caído, el nodo escoge otra ruta alterna para alcanzar el destino.

Dado que los nodos de la red presentan baja movilidad es posible reducir la frecuencia con que se actualiza la información de la topología con lo cual se logra eliminar la sobrecarga en la red producida por la información de control transmitida para la actualización.

⁵ Tipo de comunicación en la que un solo emisor llega a múltiples receptores.

1.8.3.3 Protocolo de Expansión de Árbol (*Spanning Tree Protocol, STP*)

STP es un protocolo de nivel 2 que gestiona enlaces redundantes, previniendo ciclos infinitos de repetición de datos en redes que presenten configuración redundante, es transparente a las estaciones de usuario y la versión estandarizada es IEEE 802.1D.

Los ciclos infinitos ocurren cuando hay rutas alternativas entre *hosts*, estas rutas son necesarias debido a que proporcionan redundancia y confiabilidad a la red a través de varios enlaces, pues en el caso que uno falle, otro enlace puede seguir soportando el tráfico de la red. El problema viene dado a que al existir estos ciclos en la topología de red, las tramas *broadcast* y *multicast* pueden quedarse atrapadas en un ciclo, al no existir ningún campo de Tiempo de Vida (*Time To Live, TTL*) en el nivel 2, tal y como ocurre en el nivel 3. Esto genera una reducción considerable en el ancho de banda e inutiliza la red, de modo que, STP permite solamente una trayectoria activa a la vez entre dos dispositivos de la red (esto previene los ciclos) pero mantiene los caminos redundantes como reserva si el camino inicial falla.

Si la configuración de STP cambia, o si un segmento en la red redundante llega a ser inalcanzable, el algoritmo del árbol que la atraviesa se reconfigura y restablece el acoplamiento activando la trayectoria de reserva. Si el protocolo falla, es posible que ambas conexiones estén activas simultáneamente, lo que podría dar lugar a un ciclo de tráfico infinito en la red [16].

- **Funcionamiento**

El Protocolo STP que trabaja a nivel MAC, primeramente construye un árbol de la topología de la red, comenzando desde el nodo raíz. Uno de los dispositivos STP se convierte en el nodo raíz después de ganar la selección, para ello cada dispositivo STP (*switch, AP*), en el momento de encenderse, comienza a enviar paquetes de datos específicos denominados Unidades de Datos del Protocolo Puente (*Bridge Protocol Data Unit, BPDU*) con el fin de convertirse en la raíz del árbol STP. La dirección del receptor del paquete BPDU es una dirección de un grupo *multicast*, esto permite al paquete BPDU atravesar dispositivos no inteligentes como *hubs* y *switches* no STP.

Después de recibir el paquete BPDU desde otro dispositivo, el nodo STP compara los parámetros recibidos con los propios y dependiendo del resultado decide seguir o no intentando ser el nodo raíz. Una vez terminadas las elecciones, el dispositivo con el identificador de nodo con un valor más bajo será designado raíz. El identificador de nodo es una combinación entre la dirección MAC del nodo STP y una prioridad del nodo STP predefinida.

Si se identifica un solo dispositivo STP en la red, éste será la raíz. El nodo raíz designado no tiene ninguna responsabilidad adicional, tan solo es el punto de inicio desde el cual se comenzará a construir el árbol de la topología de red. Para todos los demás nodos en una red, STP define el puerto raíz como el puerto más cercano al nodo raíz. Los demás nodos se diferencian con su identificador (combinación de la MAC y la prioridad definida para ese puerto).

El costo de la ruta hacia el nodo raíz es también un valor significativo para las elecciones STP, que se calcula a partir de la suma de los costos de las rutas del puerto raíz del nodo dado y todos los costos de las rutas a los puertos raíz de los demás nodos en la ruta hacia el nodo raíz.

Además, el nodo raíz principal STP define una entidad lógica denominada nodo designado, este cargo también está sujeto a elección. De manera similar, STP define por cada segmento de red el puerto raíz designado (que es el que sirve en cada segmento de red) y su correspondiente costo de ruta. Después de que se terminan las elecciones, la red entra en la fase estable, este estado se caracteriza por las siguientes condiciones:

- Sólo hay un dispositivo anunciando ser la raíz y éste informa a todos los demás nodos periódicamente que él es la raíz del árbol.
- El nodo raíz envía periódicamente paquetes BPDU a través de todos sus puertos con un intervalo de envío denominado *Hello Time*.
- En cada segmento existe un puerto designado, y todo el tráfico hacia el nodo raíz se realiza a través de él. Comparado con otros nodos, él es el que tiene el costo de ruta menor hacia el nodo

raíz, pero si los valores son iguales, el puerto con el identificador de puerto más bajo es el asignado.

- Las BPDUs se reciben y envían por la unidad compatible con STP de cada puerto, incluso los puertos que están deshabilitados por el propio STP. Excepcionalmente, las BPDUs no operan en puertos deshabilitados por el administrador.
- Cada nodo reenvía tramas sólo entre puertos raíz y puertos designados para los segmentos correspondientes, todos los demás puertos se bloquean. Como sigue a esto último, STP administra la topología cambiando el estado de los puertos según la siguiente lista:
 - **Bloqueado:** El puerto está bloqueado (se desechan las tramas de usuario), pero se aceptan las BPDUs.
 - **A la escucha:** Primer escenario antes del reenvío. Las tramas STP (BPDUs) se aceptan, pero las tramas de usuario no se procesan. No se aprenden direcciones, ya que esto podría introducir datos erróneos en las tablas de conmutación en este momento.
 - **Aprendiendo:** Segundo escenario de preparación para el estado de reenvío. Las BPDUs se procesan por completo, pero las tramas de usuario sólo se utilizan para construir las tablas de conmutación y no se reenvían.
 - **Reenviando:** Todas las tramas se procesan.

En el momento de la reconfiguración de la topología de la red, todos los puertos de los nodos están en uno de estos tres estados, bloqueados, a la escucha o aprendiendo, las tramas de usuario no se entregan y la red trabaja sólo para si misma, no para los usuarios. En el estado estable, todos los nodos esperan la llegada periódica de paquetes BPDUs *Hello* desde el nodo raíz. Si en el período de tiempo definido por el parámetro *Max Age Time* no llega ningún paquete BPDUs *Hello*, el nodo decide si el nodo raíz está desconectado o si el enlace se ha caído. En cualquier caso, el nodo inicia la reconfiguración de la topología de red. Definiendo los parámetros correspondientes es posible regular que tan rápido los nodos STP pueden encontrar los cambios de topología y habilitar los enlaces de reserva [17].

Hasta el momento, se han abordado las características fundamentales de las redes inalámbricas en malla, identificando sus arquitecturas de red, escenarios de aplicación y principales protocolos de enrutamiento para redes fijas, lo cual genera una primera aproximación hacia el comportamiento de estas redes y permite observar su gran potencialidad y capacidad. En el anterior estudio pudo observarse, que las redes inalámbricas en malla pueden solucionar los problemas de comunicación entre puntos distantes, por lo cual se hace necesario estudiar con mayor profundidad las técnicas de transporte de voz sobre estas redes y los factores que deben tenerse en cuenta para suministrar un servicio adecuado. Para cumplir con este propósito, en la sección 1.9 se detalla el funcionamiento de la VoIP en las WMNs.

1.9 VOZ SOBRE IP EN REDES INALÁMBRICAS EN MALLA

1.9.1 Introducción

Las tecnologías inalámbricas y la VoIP están transformando radicalmente el sector de las telecomunicaciones. Las redes inalámbricas permiten un despliegue rápido y a bajo costo del servicio de transmisión de datos a poblaciones urbanas y rurales, a la vez que amplían las opciones de *backhaul* en sistemas móviles y del último tramo de servicio al cliente. Por su parte, la VoIP realza el valor de las redes IP y es un desafío directo a modelos tradicionales que se basan en redes fijas de circuito conmutado. Las tecnologías inalámbricas y de VoIP en conjunto, comienzan a socavar el dominio habitual de los operadores tradicionales. En países desarrollados estos avances se ven como oportunidades para aumentar la competencia basada en redes rivales y son bien recibidos por los reguladores. La situación es diferente en países en vía de desarrollo, donde los reguladores son por lo general débiles, carecen de independencia e inclusive a veces forman parte de un sistema regulatorio capturado por el operador dominante. Los operadores tradicionales son desafiados en mercados urbanos principalmente por operadores de redes móviles. Pero los mercados potenciales restantes son rurales, donde la población tiene bajo poder adquisitivo y el costo de servicio con telefonía fija es alto. Servir estos mercados requiere de grandes inversiones de baja rentabilidad y alto riesgo. Pocos operadores incursionan en ese mercado, no sólo por el riesgo y la baja rentabilidad, sino también por

los obstáculos que representa intentar penetrar un mercado débilmente regulado, dominado por un operador poderoso.

Pese a estas situaciones de orden económico, el desarrollo de las tecnologías inalámbricas y la VoIP demuestran ser una alternativa viable para resolver las necesidades de comunicación en un entorno rural, debido a que integran características de movilidad y cobertura (entregadas por la WLAN), así como disminución de costos de llamada, portales de voz, reconocimiento y generación del habla (entregadas por la VoIP). Esta combinación, conocida como VoWLAN, permite la aparición de servicios de voz de alta movilidad, análogos a los de la telefonía celular actual, pero fuertemente enriquecidos con las capacidades de datos.

1.9.2 Definición de VoIP

La telefonía IP conjuga dos mundos históricamente separados: la transmisión de voz y la de datos. Se trata de transportar la voz, previamente convertida a datos, entre dos puntos distantes. Esto posibilita utilizar las redes de datos para efectuar las llamadas telefónicas, y por ende desarrollar una red única convergente que se encargue de cursar todo tipo de comunicación, ya sea voz, datos, video o cualquier otra información.

La VoIP, por lo tanto, no es en sí mismo un servicio, sino una tecnología que permite encapsular la voz en paquetes para poder transportarse sobre redes de datos sin necesidad de disponer de los circuitos conmutados convencionales que conforman lo que se conoce como la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC), la cual se ha implementado a lo largo de los años para transmitir las señales vocales. La RTPC se basa en el concepto de conmutación de circuitos, es decir, la realización de una comunicación requiere del establecimiento de un circuito físico durante el tiempo que dura ésta, lo que significa que los recursos que intervienen en la realización de una llamada no pueden utilizarse en otra hasta que la primera no finalice, incluso durante los silencios que suceden dentro de una conversación típica.

En cambio, la telefonía IP no utiliza circuitos físicos para la conversación, sino que envía múltiples conversaciones a través del mismo canal codificadas en paquetes y flujos independientes. Adicionalmente, existen esquemas para la Detección de Actividad de la Voz (*Voice Activity Detection*, VAD) que permiten transmitir datos de otras conversaciones cuando se produce un silencio en una conversación, lo que implica un uso más eficiente de la misma.

De acuerdo con lo descrito, son evidentes las ventajas que proporcionan las redes de VoIP, pues, con la misma infraestructura se prestan más servicios y la velocidad es mayor. Sin embargo, son muchos los obstáculos existentes para la transmisión de voz de alta calidad en una red IP, ya que no es posible determinar la duración del paquete dentro de la red hasta que este llegue a su destino, además, existe la posibilidad de pérdida de paquetes y es práctica común la retransmisión de un paquete perdido o recibido con errores. En este sentido, cabe notar que en transmisión de voz es totalmente inútil la retransmisión de un paquete después de un centenar de milisegundos debido a que los retardos de varios cientos de milisegundos son inaceptables. Es por esto que el éxito de la VoIP se puede garantizar en redes privadas, en las cuales se pueda establecer un límite máximo en los tiempos de transmisión. Esto se consigue estableciendo algún sistema de prioridades para el tráfico de voz respecto a otros datos y limitando el número de enrutadores que tiene que atravesar el mensaje para llegar a su destino.

En cambio, en Internet la voz sobre IP es de inferior calidad al no poderse ofrecer estas garantías, conocidas normalmente como Calidad de Servicio (*Quality of Service*, QoS). Sin embargo, numerosas empresas ofrecen telefonía sobre Internet a costos muy inferiores para aquellos clientes que están dispuestos a aceptar compromisos con la calidad. Es de esperar que a medida que las grandes empresas de telecomunicaciones incorporen QoS en sus redes de datos se pueda utilizar VoIP sin sacrificios de calidad, aún en Internet.

Las funciones básicas que debe realizar un sistema de voz sobre IP son:

- 1.** Digitalización de la voz.
- 2.** Paquetización de la voz.
- 3.** Enrutamiento de los paquetes.

Si se pretende conectar a la red pública conmutada, adicionalmente se requiere de un mecanismo para convertir las direcciones IP a números telefónicos y viceversa, utilizando el método de señalización adecuado a la red telefónica con la que se está conectando. Frecuentemente se puede requerir instrumentos de tarificación y control de acceso. También existen numerosos estándares que cubren cada uno de estos aspectos, algunos provenientes del mundo de la telefonía, como los codificadores/decodificadores (codecs) utilizados para digitalizar la voz, y otros provenientes de la transmisión de datos, como los protocolos de transmisión de paquetes.

En general, las ventajas que se obtienen al comprimir la voz con códigos más sofisticados y por la supresión de los períodos de silencio, son contrarrestadas por la necesidad de dotar a cada paquete de voz con la información necesaria para enrutarlo a su destino, por lo que es difícil estimar exactamente cuál será el ancho de banda requerido por un sistema de VoIP. Sin embargo, este ancho de banda es siempre considerablemente inferior a los 64 Kbps requeridos por la Modulación por Impulsos Codificados (*Pulse Code Modulation, PCM*) en la telefonía clásica.

1.9.3 Estándares de Compresión de Voz

La comunicación de voz es analógica, por esta razón antes de que la voz se transmita sobre una red IP, primero debe digitalizarse. El proceso de convertir ondas analógicas a información digital se hace por medio de un algoritmo de compresión/descompresión (codec). Los algoritmos de compresión utilizados en los codecs analizan un bloque de muestras PCM entregadas por el codificador de voz. Estos bloques tienen una longitud variable que depende del codificador, por ejemplo, el tamaño básico de un bloque del algoritmo G.729 es 20 ms. En la Figura 1-21 [18], se muestra un ejemplo de cómo funciona el sistema de compresión G.729. La cadena de voz analógica se digitaliza en tramas PCM y se entrega al algoritmo de compresión en intervalos de 20 ms.

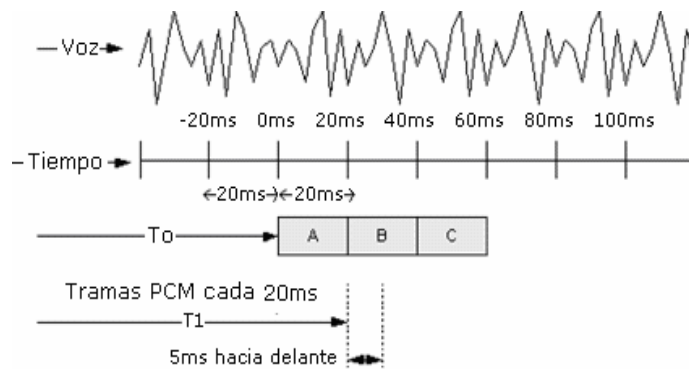


Figura 1-21. Sistema de compresión G.729

Los paquetes de voz y vídeo se transportan a través del Protocolo de Transporte en Tiempo Real (*Real Time Transport Protocol, RTP*) y se codifican a partir de varios algoritmos de compresión que se diferencian por el ancho de banda utilizado y la calidad de la comunicación. Generalmente se requiere que los interlocutores negocien el mismo codec para poder comunicarse o evitar el *transcoding*⁶ que implica mayores retardos en la conversación. A continuación se describen los codecs de audio más conocidos y utilizados, con sus características más relevantes.

G.711: Es el estándar para enviar audio en un canal de 64 Kbps, muestrea la señal a 8 KHz, es decir, transmite la voz en la banda de 0 a 4 KHz, se utilizan 8 bits por muestra de forma fija, utiliza PCM para la modulación de la voz y se recomienda para redes con ancho de banda suficiente.

G.722: Utiliza de la Modulación por Impulsos Codificados Diferencial Adaptativa (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation, ADPCM*) para transmitir audio de alta calidad de 7 KHz en 48, 56 o 64 Kbps. Esta recomendación también permite la transmisión de datos a 16 Kbps sobre un canal de 64 Kbps, con los 48 Kbps restantes para audio.

⁶ Conversión de un formato de audio a otro

G.726: Utiliza la modulación ADPCM para la transmisión de los datos a 16, 24, 32, 40 Kbps, su rendimiento y calidad a 40 Kbps son comparables con las del codec G.711.

G.728: Codifica las señales vocales a 16 Kbps utilizando Predicción Lineal con Excitación por Código de Bajo Retardo (*Low Delay Code Excited Linear Prediction, LD-CELP*). Comparado con G.721, G.728 tiende a ser objetivamente peor, pero es mejor en pruebas subjetivas, tiende a funcionar peor en presencia de ruido.

G.729: Codificador de la voz a 8 Kbps mediante Predicción Lineal con Excitación por Código Algebraico de Estructura Conjugada de Complejidad Reducida (*Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction, CS-ACELP*), se desarrolló para utilizarse en situaciones de multimedia con voz y datos, además tienen una buena relación ancho de banda/calidad.

Codec para Sistemas Globales de comunicaciones Móviles (*Global System for Mobile communications, GSM*): El codec GSM se utiliza en telefonía móvil digital en Europa extensivamente, y en otras partes del mundo, es muy utilizado también en el mundo de VoIP, por ser libre y tener una buena relación calidad/ancho de banda.

Codec de Internet de Baja velocidad de Bit (*Internet Low Bitrate Codec, ILBC*): Es un codec reciente diseñado por GIPS (*Global IP Sound*) y sometido al IETF para su consideración como norma para niveles bajos de ancho de banda, en la actualidad existe una realización gratuita y abierta de GIPS para uso personal.

LPC-10: Es un codec diseñado por el Departamento de Defensa americano (*Department of Defense, DoD*) para una banda muy estrecha (2.4 Kbps) y bajo gasto de procesador.

La Tabla 1-2 [19] muestra, de forma resumida, las características más sobresalientes de estos codecs.

TABLA 1-2. CODECS UTILIZADOS PARA VOIP

Nombre	Velocidad Binaria (Kbps)	Tamaño de paquete (bytes sin encabezado)	Duración de un paquete (ms) ¹	Puntuación MOS ²
G.711	64	160	20	4.3
G.726	16,24,32,40	80	20	3.85 para 32 Kbps
G.728	16	60	30	3.9
G.729	8	20	20	4.0
GSM	13	33	20	3.5-3.7
iLBC	13.3/15	50	30/20	4.1/4.2
LPC-10	2.4	30	30	2.5

1 Duración de un paquete: Los datos que se indican en la tabla corresponden a los valores típicos utilizados normalmente. Se puede aumentar o disminuir el intervalo de muestreo, pero esto incide directamente sobre el retardo del paquete, la eficiencia del codec, etc. Evidentemente, el tamaño del paquete variará proporcionalmente.

2 Puntuación de Opinión Media (*Mean Opinion Score, MOS*): Escala para medir la percepción subjetiva de la calidad de voz tras pasar por estos codecs, va desde 1 (mala) hasta 5 (excelente). En este caso es la MOS medida en condiciones ideales, sin pérdida de paquetes ni distorsión adicional.

1.9.4 Tipos de Protocolos de VoIP

Gracias a los organismos de estandarización como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*Internacional Telecommunication Union, ITU*) y al IETF la tecnología de VoIP ha evolucionado a lo

largo de estos años y ha superado las distintas barreras existentes (escalabilidad, interoperabilidad con otras redes y entre fabricantes, etc.). Los dos principales protocolos de señalización son H.323 de UIT y el Protocolo de Inicio de Sesión (*Session Initiation Protocol*, SIP [20]) de IETF. Por razones de simplicidad y flexibilidad el protocolo SIP es el más utilizado y por lo tanto, es el que se estudia con más detenimiento en este trabajo de grado.

1.9.4.1 Protocolo de inicio de sesión

SIP es un protocolo de sesión diseñado por el IETF, definido inicialmente en la Solicitud de Comentarios (*Request For Comments*, RFC) 2543, y más adelante redefinido en la RFC 3261. Como su propio nombre lo indica, es un protocolo cuyo objetivo consiste en proporcionar el mecanismo para establecer, modificar, y abandonar una sesión entre dos terminales, así como poder localizar y registrar usuarios, sin tener en cuenta el tipo de datos a transmitir en la sesión o la forma de transporte de los mismos. SIP va acompañado del Protocolo de Descripción de Sesión (*Session Description Protocol*, SDP [21]), especificado en la RFC 2327, cuya tarea consiste precisamente en describir los detalles de la llamada, desde los codecs a utilizar para los distintos tipos de datos, como audio o vídeo, hasta los puertos que se especifican para ello. Para trasportar los datos de voz en tiempo real, se utilizan los protocolos RTP [22] y Control de Transporte en Tiempo Real (*Real Time Control Protocol*, RTCP). SIP es un protocolo del nivel de aplicación para establecimiento y gestión de sesiones con múltiples participantes y puede ejecutarse sobre el Protocolo de Datagrama de Usuario (*User Datagram User*, UDP) o sobre el Protocolo de Control de Transmisión (*Transmission Control Protocol*, TCP).

1.9.4.2 RTP/RTCP

Para aplicaciones como la telefonía IP, con flujos de datos en tiempo real, se desarrollaron los protocolos RTP/RTCP. Estos protocolos son capaces de proporcionar calidad relativamente aceptable a los flujos de datos de tiempo real mediante mecanismos como control de datagramas descartados en la red, o control del orden correcto de reensamblaje de los mensajes, por citar dos de los más comunes. Son protocolos de nivel de aplicación y evidentemente, por sus necesidades de tiempo real, los mensajes RTP/RTCP se encapsulan sobre datagramas UDP, lo que garantiza que los procesos que realizan los protocolos de nivel inferior añaden el mínimo retardo, además no es necesario establecer una conexión como ocurre cuando se utiliza TCP.

A nivel general se habla de una sesión RTP, en la cual dos o más participantes intercambian flujos de datos entre sí, utilizando un par de puertos para cada tipo de comunicación (para el canal RTP se utiliza un número de puerto par y para el RTCP el puerto consecutivo impar). A cada uno de los participantes que envía datos se le llama *synchronization source*, y se le identifica unívocamente dentro de la sesión mediante un número de 32 bits que se escoge aleatoriamente; aunque la probabilidad de que dos fuentes escojan el mismo número es muy baja, en la propia RFC se contempla esta posibilidad y se proporcionan los mecanismos para evitarlo. El puerto RTP se utilizará entonces para el envío del flujo y el RTCP en general se utilizará para proporcionar un mecanismo de control dando principalmente realimentación a la fuente, tal como aparece en la Figura 1-22 [23].



Figura 1-22. Paquetes RTP y RTCP para el control de la calidad en recepción

1.9.5 Encapsulamiento de una Trama de VoIP

Una vez que la llamada se establece, la voz se digitaliza y se transmite a través de la red en tramas IP. Las muestras de voz primero se encapsulan en RTP y luego en UDP antes de transmitirse en una trama IP. La Figura 1-23 [24] muestra un ejemplo de una trama de VoIP.

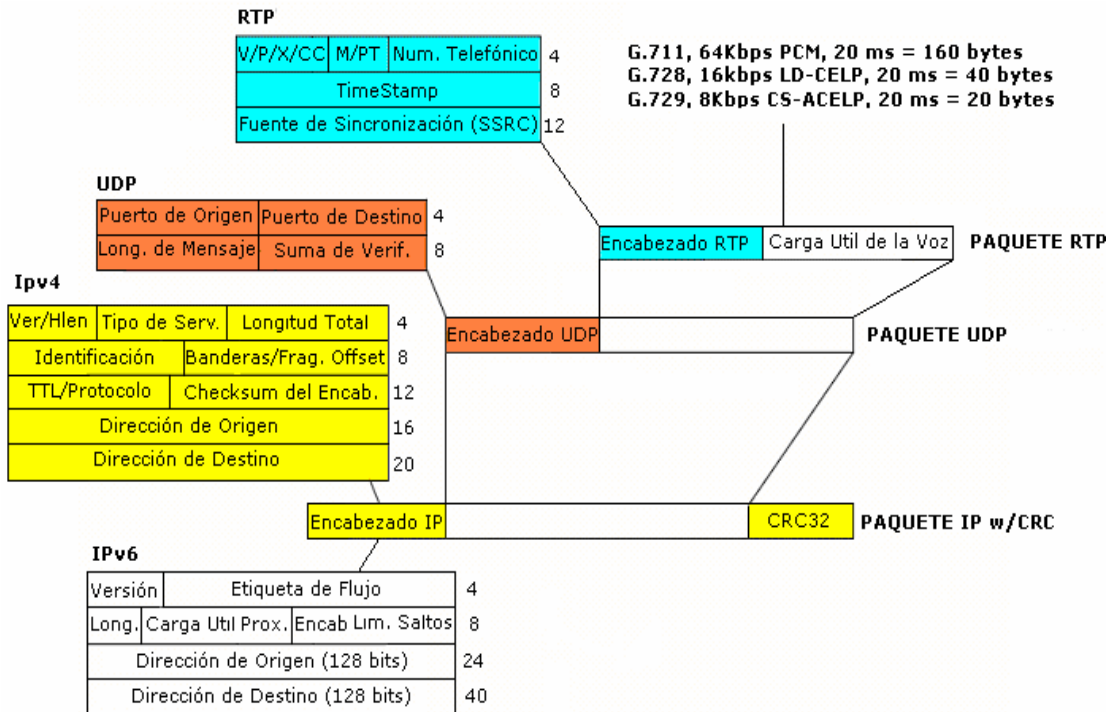


Figura 1-23. Encapsulamiento de una trama VoIP

En la Figura 1-23 se observa que si el codec utilizado es G.729 y el periodo de paquetización es 20 ms, la carga útil será de 20 bytes.

1.9.6 Factores que Afectan la Calidad de Voz

Cuando se requiere implementar una red para el transporte de VoIP es necesario identificar los factores que afectan la calidad de la voz, producidos por cada uno de los procesos por los cuales pasa la señal antes de llegar a su destino final. Esto permitirá al administrador de la red establecer los criterios necesarios para que los factores se mantengan en un límite que no perjudique las comunicaciones entre los diferentes puntos. A continuación se describen los parámetros más influyentes en la calidad de la voz.

1.9.6.1 Retardo o latencia

Engloba todos los efectos que sumados constituyen el tiempo de tránsito desde que la señal original se emite hasta que se recompone en el receptor, su influencia es muy importante, hasta el punto de poder limitar el uso de VoWLAN en ciertos entornos.

Atendiendo a las recomendaciones existentes para la telefonía tradicional, el retardo máximo para una comunicación de buena calidad de extremo a extremo según la recomendación ITU G.114 no debe superar los 150 ms, sin embargo, los valores que con frecuencia se obtienen pueden superar esta cifra, dificultando la comunicación y proporcionando una sensación incómoda a los participantes de la comunicación.

La Tabla 1-3 [23] muestra los valores que indican las clases de calidad e interactividad de acuerdo con el retardo de transmisión en una conversación telefónica.

TABLA 1-3. CLASES DE CALIDAD DE LA ITU SEGÚN RETARDOS DE TRANSMISIÓN

Clase	Retardo por cada sentido	Descripción
1	De 0 a 150 ms	Comunicación de alta calidad
2	De 150 a 400 ms	Admisible, aunque el administrador de la red debe estar atento del impacto del tiempo de transmisión en la calidad de la voz
3	Sobre 400 ms	Inaceptable. Conversaciones muy molestas

Los principales factores que afectan este parámetro son:

- **Retardo de paquetización:** Es el tiempo para llenar un paquete de información (carga útil), de la conversación ya codificada y comprimida. Es un valor que varía con el tipo de algoritmo de codificación seleccionado. La RFC 1890 especifica que el retardo de paquetización por defecto debe ser de 20 ms. Para G.729, esto significa que 20 muestras se acumularán y transmitirán en una sola trama. Cada trama de voz se transmite como un paquete RTP simple. La Tabla 1-4 [23] muestra los retardos de paquetización más comunes.

TABLA 1-4. RETARDOS DE PAQUETIZACIÓN

Codificador	Carga Útil (Bytes)	Retardo de Paquetización (ms)
G.711	160	20
G.726	80	20
G.729	20	20

- **Retardo por los elementos de red:** La información atraviesa elementos de red (enrutadores, APs, switches, etc.) que imponen un incremento de la latencia debido al proceso de la información que realizan.
- **Retardo de propagación:** La distancia física entre extremos influye casi linealmente en la demora de la recepción del mensaje. Cuando las distancias son muy elevadas, este valor puede tener una importancia considerable, es por tanto, un factor muy variable en cada comunicación, sin embargo, en las redes inalámbricas en malla este factor disminuye considerablemente debido a la ventaja que tienen este tipo de redes de llegar al destino final a través de múltiples saltos con distancias más cortas. Las tecnologías inalámbricas soportan comunicaciones que van desde unos cuantos metros hasta cientos de kilómetros, así por ejemplo, existen redes que comunican entornos rurales como los de EHAS-Pacífico por medio de enlaces Wi-Fi punto a punto de hasta 90 Km y suministran servicios de VoIP sin ningún impacto del retardo que haga inaceptable la comunicación [25].
- **Retardo algorítmico:** El algoritmo de la compresión, que depende de características conocidas de la voz para procesar correctamente el bloque N de la muestra, debe tener algún conocimiento de lo que está en el bloque N + 1 para reproducir exactamente el bloque de la muestra N. Esta mirada hacia adelante, que es realmente una demora adicional, se llama retardo algorítmico y aumenta efectivamente la longitud del bloque de compresión, como se ve en la Figura 1-21. La Tabla 1-5 [23] muestra los retardos algorítmicos más comunes.

TABLA 1-5. RETARDOS ALGORÍTMICOS

Codificador	Retardo Algorítmico (ms)
G.711	0.125
G.726	1
G.728	3-5
G.729	5

- **Variación del retardo (*Jitter*):** Se genera principalmente por los elementos de red y líneas de comunicaciones, que pueden sufrir congestiones o problemas puntuales que derivan en retardos variables e impredecibles. El segmento inalámbrico es especialmente sensible a las ráfagas de datos producidas por cualquiera de los emisores conectados, para evitar la variación del retardo, cada salto debe minimizar la latencia del paquete. El tiempo que está un paquete en cualquier nodo de la malla debe minimizarse (idealmente 5 milisegundos por salto), los valores de variación del retardo por debajo de los 50 ms son aceptables para una buena transmisión [8] [26] [27] [28].

1.9.6.2 Calidad de la señal decodificada

Además del retardo, existen una serie de factores que afectan directamente a la calidad del mensaje recibido. Los principales son:

- **Pérdida de paquetes:** Las comunicaciones de voz en redes IP se suelen realizar mediante el protocolo UDP en vez de TCP, sin retransmisiones de paquetes en caso de pérdidas, puesto que el reenvío de un paquete supondría un retardo inaceptable en la comunicación. La pérdida de paquetes también afecta la calidad de la voz, pero el porcentaje admisible depende en alguna medida de los algoritmos de compresión utilizados, algunos bajo ciertas condiciones recuperan errores. El porcentaje de pérdida de paquetes para una conversación de voz debe ser menor al 3 % de acuerdo a la recomendación ITU-T G.1010 [29].
- **Método de codificación:** Existen diversos algoritmos de codificación que comprimen en mayor o menor grado la información, obteniendo inversamente una menor o mayor velocidad de bit (*bit rate*). Pero, generalmente, una mayor compresión de la información conlleva una menor calidad en el mensaje recuperado, dificultando su compresión.
- **Ancho de banda y número de clientes por celda:** La selección de un método de codificación de calidad (G.729, G.723) conlleva un ahorro en la velocidad de bit. Esto es especialmente positivo en el segmento inalámbrico, donde múltiples usuarios tienen que compartir un ancho de banda en general reducido.

1.9.6.3 Saltos Inalámbricos Múltiples

Cuando una red inalámbrica en malla contiene múltiples saltos, ésta se vuelve más vulnerable a los problemas tales como la degradación del ancho de banda, interferencia, latencia en la red, etc. Estos fenómenos aumentan desorbitadamente cuando las áreas geográficas a cubrir son extensas. Por ejemplo, con cada salto en la red, el *throughput* fácilmente puede disminuir al 50 % por salto, descomponiéndose rápidamente sobre múltiples saltos, resultando una seria degradación del desempeño a través de la red. Por lo tanto, cuando estos fenómenos alcanzan niveles inaceptables, podrían causar pérdidas en aplicaciones de tiempo real, tal como la VoIP.

La gravedad de estos problemas varía ampliamente según la arquitectura inalámbrica en malla utilizada (única frecuencia, doble frecuencia o múltiple frecuencia).

1.9.7 Requisitos para el Envío de VoIP en una Red Inalámbrica en Malla

Finalmente, es de gran importancia mencionar los factores que debe proporcionar el *backbone* de la malla para la correcta transmisión de paquetes de VoIP.

- **Alto *Throughput* a través de múltiples saltos:** Independientemente del número de saltos (generalmente entre 3 y 10), el *backbone* en malla debe estar en capacidad de soportar alta carga de tráfico. La capacidad para proporcionar un alto *throughput* es directamente equivalente al número de usuarios que soporten voz y datos. Un ancho de banda inadecuado a través de los múltiples saltos resulta insatisfactorio para los usuarios.
- **Baja latencia a través de múltiples saltos:** El alto *throughput* no es suficiente, para evitar variación del retardo, cada salto debe minimizar la latencia del paquete. El tiempo que está un paquete en cualquier nodo de la malla debe minimizarse (idealmente 5 ms por salto), para un total de 50 ms a través de 10 saltos.

Cada uno de estos parámetros incide directamente sobre la escalabilidad (en términos de número de usuarios y cobertura de la red) y calidad de la voz. Si una red inalámbrica en malla no proporciona estos requerimientos, la funcionalidad de la voz puede resultar muy deficiente.

En resumen, para que una comunicación de VoIP sobre una WMN se considere adecuada y de buena calidad se debe cumplir con los requerimientos anteriormente descritos, no sobrepasar los límites establecidos por la recomendación UIT-T G.114, la cual establece 150 ms como retardo máximo en el trayecto de extremo a extremo, *jitter* menor a 50 ms y pérdidas de paquetes menores al 3%.

Hasta aquí, se han abordado aspectos característicos de las redes inalámbricas en malla como su arquitectura de red, tipos de configuración, características, escenarios de aplicación, protocolos de enrutamiento y manejo de la VoIP; que permiten entender la manera como se crean este tipo de redes, identificar sus capacidades y particularidades. A partir de este estudio es posible concluir que la tecnología de las redes inalámbricas en malla presenta grandes ventajas que solucionarían los problemas de comunicación de un entorno rural, por lo cual se hace necesario estudiar con mayor profundización la implementación de estas redes sobre las tecnologías inalámbricas que las soportan, de manera que se logre establecer el modelo de red adecuado para cumplir con el objetivo principal del proyecto que se resume en el diseño de una red en malla para el transporte de VoIP en un entorno rural. Con este propósito, en el siguiente capítulo se presenta un análisis comparativo de los estándares que operan en la configuración de malla, que permitirá determinar la mejor tecnología para la implementación de la red.

2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESTÁNDARES IEEE 802.15.4, 802.11 Y 802.16 EN SU MODO DE OPERACIÓN DE MALLA

Como pudo notarse en el capítulo anterior, las redes inalámbricas demuestran ser una solución efectiva para el intercambio de información en tiempo real eliminando la necesidad de estar físicamente conectados a una red local. Gracias a sus múltiples ventajas que pueden resumirse en movilidad, flexibilidad, mínimo esfuerzo de instalación y reducción significativa de los costos de instalación y mantenimiento; estas tecnologías están siendo fuertemente adoptadas en múltiples escenarios con lo cual se logra producir gran cantidad de productos en el mercado, a precios considerablemente bajos y mucha flexibilidad de uso en combinación con desarrollos de *software* libre.

El principal organismo de estandarización de las tecnologías inalámbricas es el IEEE quien define un conjunto de estándares para el entorno de la gestión de las redes inalámbricas, que incluyen: IEEE 802.15 para Redes de Área Personal (*Personal Area Network, PAN*), IEEE 802.11 para Redes de Área Local (*Local Area Network, LAN*), IEEE 802.16 para MAN y el propuesto IEEE 802.20 para Redes de Área Amplia (*Wide Area Network, WAN*), tal como se ilustra en la Figura 2-1 [30]. Cada estándar mencionado representa una tecnología optimizada para un mercado y modelo de uso distinto y se diseñó para complementar los otros.

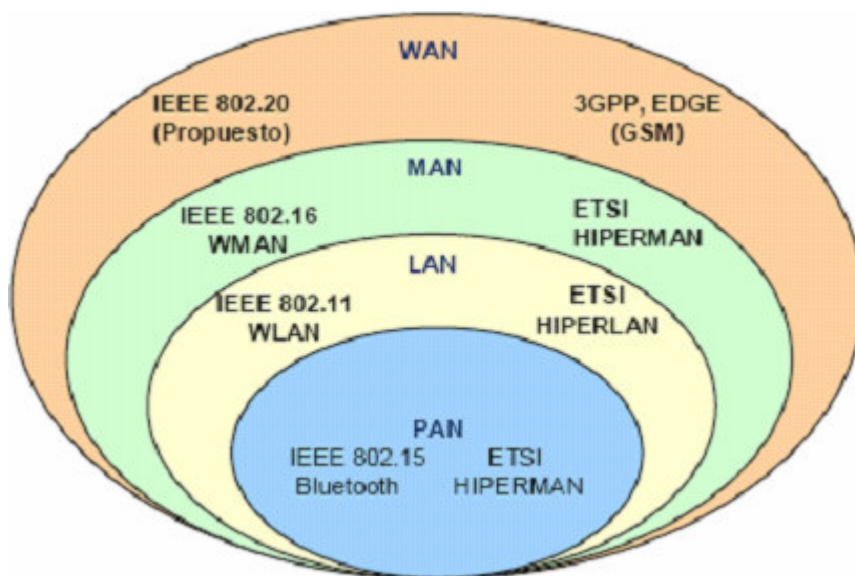


Figura 2-1. Familia de estándares inalámbricos

El objetivo del presente capítulo es realizar una descripción de los estándares inalámbricos IEEE que permiten la operación de sus dispositivos en la configuración de malla para generar un punto de comparación de los aspectos más sobresalientes de dichas tecnologías y posteriormente identificar cuál de ellas presenta las mayores ventajas para implementar una solución de comunicación de VoIP en un entorno rural en los términos planteados en el presente proyecto.

A continuación se describen los procesos que los estándares IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16-2004 realizan para habilitar la configuración de malla en los dispositivos y para facilidad del lector, en el Anexo A pueden revisarse los fundamentos y características principales de estos estándares.

2.1 ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 [31] comercialmente conocido como ZigBee, opera bajo el marco de las denominadas redes de área personal. Este estándar se aprobó en mayo de 2003 y los primeros dispositivos ZigBee salieron a la venta en el cuarto trimestre de 2004.

Una Red Inalámbrica de Área Personal de Baja Velocidad (*Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN*), es una red de comunicación sencilla y de bajo costo que permite una conexión inalámbrica

en aplicaciones que no requieren alto desempeño y cuentan con una potencia limitada para su operación. Los principales objetivos de una LR-WPAN son facilitar la instalación de las redes, lograr una transmisión confiable de los datos, trabajar en un pequeño rango de operación, reducir los costos y suministrar larga vida a las baterías, mientras se mantiene un protocolo simple y flexible.

El estándar IEEE 802.15.4-2003 define el protocolo e interconexión de dispositivos a través de enlaces de radiocomunicación dentro de una PAN, utiliza el mecanismo de acceso CSMA/CA y soporta topologías de punto a punto, estrella, árbol y malla. El acceso al medio es orientado a la conexión, pero si se hace uso de una estructura de supertrama opcional, el coordinador de la PAN puede asignar los intervalos de tiempo (*time slot*) a los dispositivos que contengan datos que deben entregarse en el menor tiempo posible. En general, el coordinador de la PAN debe proporcionar la conectividad para lograr un alto desempeño en la red.

En las siguientes secciones se presenta un resumen de las características más importantes del estándar IEEE 802.15.4-2003 enfocado principalmente al tratamiento de la malla, dado que éste es el tema de interés para el proyecto.

2.1.1 Componentes de una WPAN IEEE 802.15.4

La red LR-WPAN dispone de dos tipos de nodo distintos:

- **Dispositivo de Función Completa (Full Function Device, FFD):** es un dispositivo que puede utilizarse en cualquier topología y tiene la capacidad de trabajar como el coordinador de toda la PAN, como coordinador de un segmento o como un nodo normal. Además, puede hablar con otros FFDs o dispositivos de función reducida a diferencia de estos últimos que sólo pueden hablar con un FFD.
- **Dispositivo de Función Reducida (Reduced Function Device, RFD):** este dispositivo puede utilizarse en aplicaciones extremadamente simples, como el cambio de una luz o un sensor infrarrojo pasivo; no tiene necesidad de enviar grandes cantidades de datos y sólo puede asociarse con un FFD al tiempo. Por consiguiente, un RFD puede implementarse utilizando muy pocos recursos y una capacidad de memoria muy baja. Por sus características limitadas sólo puede utilizarse en una topología de estrella.

2.1.2 Formación de una Topología de Malla

Dependiendo de los requerimientos de la aplicación, la LR-WPAN puede operar en dos topologías: estrella y punto a punto, de las cuales se derivan otro tipo de topologías más complejas como la de árbol o la de malla. Dichas configuraciones se pueden observar en la Figura 2-2 [32].

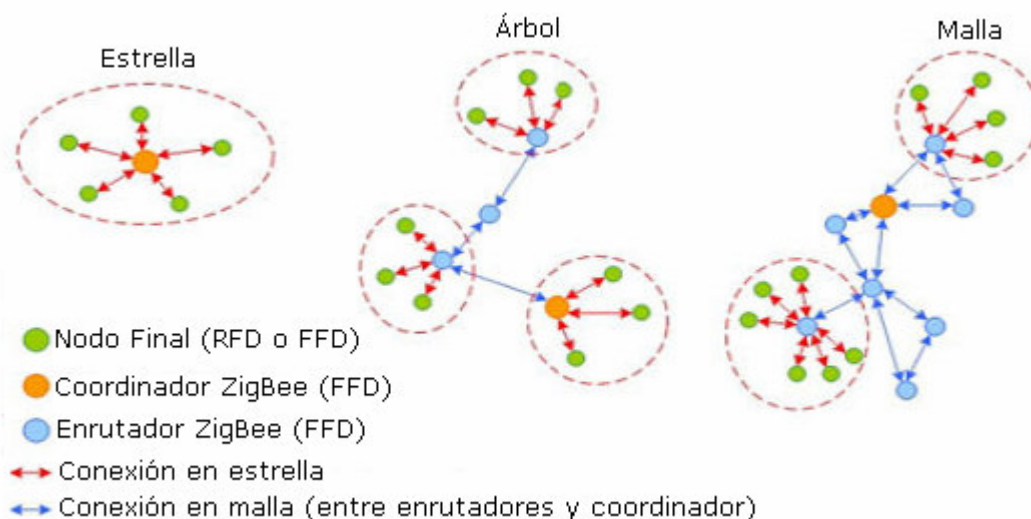


Figura 2-2. Topologías de red en estrella, árbol y malla

La formación de la red se realiza por el nivel de red que no hace parte del estándar IEEE 802.15.4. Sin embargo, en este mismo estándar se presenta una breve descripción de la formación de una red punto a punto que da pie a entender la configuración de la topología de malla.

En una topología punto a punto, cada dispositivo puede comunicarse con otro dentro de su radio de influencia. Un dispositivo se designará como el coordinador PAN, por ejemplo, en virtud de ser el primer dispositivo que se comunica con el canal. Adicionalmente, las estructuras de red pueden construirse fuera de la topología de punto a punto y pueden imponer restricciones topológicas en la formación de la red.

Cada PAN independiente seleccionará un identificador único que permite la comunicación entre dispositivos dentro de la red utilizando direcciones cortas y habilitando las transmisiones entre dispositivos a través de redes independientes.

Un ejemplo del uso de una topología punto a punto es un árbol de grupos de celdas (*cluster tree*) en el cual, la mayoría de los dispositivos son FFDs. Un RFD puede conectarse al árbol de grupos de celdas como un nodo lejano al final de una rama, debido a que éste sólo puede asociarse con un FFD a la vez. Cualquiera de los FFDs puede actuar como coordinador y proporcionar los servicios de sincronización a los otros dispositivos o coordinadores. Sólo uno de estos coordinadores puede ser el coordinador de toda la red de área personal y puede tener más recursos computacionales que cualquier otro dispositivo en la PAN. El coordinador forma el primer grupo de celdas estableciéndose a sí mismo como la Cabecera del Grupo de Celdas (*Cluster Head, CLH*) con un Identificador de Grupo de Celdas (*Cluster Identifier, CID*) igual a cero, luego escoge un identificador PAN que no esté en uso y transmite tramas de señales de guía (*beacon frames*) a los dispositivos vecinos. Un dispositivo candidato que recibe una trama *beacon* puede solicitar la asociación de la red al CLH y si el coordinador lo acepta, éste adicionará el nuevo dispositivo como un dispositivo hijo en su lista de vecinos. Por su parte, el nuevo dispositivo asociado adicionará el CLH como su padre en su lista de vecinos e iniciará la transmisión de tramas *beacons* periódicas. Otros dispositivos candidatos pueden entonces, asociar la red a este dispositivo. Si el dispositivo candidato original no puede asociar la red al CLH, el dispositivo buscará a otro dispositivo padre.

A partir de la formación de un árbol de grupos de celdas se puede entender la creación de una red en malla pensando en esta última como la unión de varios grupos de celdas adyacentes. Para tal fin, a medida que más árboles de grupos de celdas se vayan formando, el coordinador PAN instruirá a otros dispositivos para que se conviertan en las CLH de cada grupo de celdas adyacente y de esta manera, otros nodos tendrán la posibilidad de comunicarse con varios CLH de diferentes grupos de celdas y formarán una estructura de red en malla también denominada *multicluster*. Adicionalmente, para habilitar el enrutamiento de la información en caso de que ocurran fallas en los nodos principales, el coordinador de la PAN debe implementar un protocolo de enrutamiento que permita retransmitir la información por una ruta alterna a otros dispositivos.

Un ejemplo de esta configuración se presenta en la Figura 2-3 [31], en la cual debe aclararse que las líneas representan las relaciones padre-hijo entre los dispositivos y no el flujo de comunicación, pues gracias a la topología de malla los dispositivos pueden comunicarse directamente con otro CLH de otro grupo de celdas siempre y cuando éste se encuentre dentro de su rango de alcance. La ventaja de una estructura en malla es el incremento del área de cobertura, mientras que su desventaja es el incremento en la latencia de los mensajes.

Una topología de este tipo puede ser provechosa en aplicaciones de control y monitoreo, redes de sensores inalámbricas, seguimiento de bienes e inventarios, agricultura inteligente y seguridad.

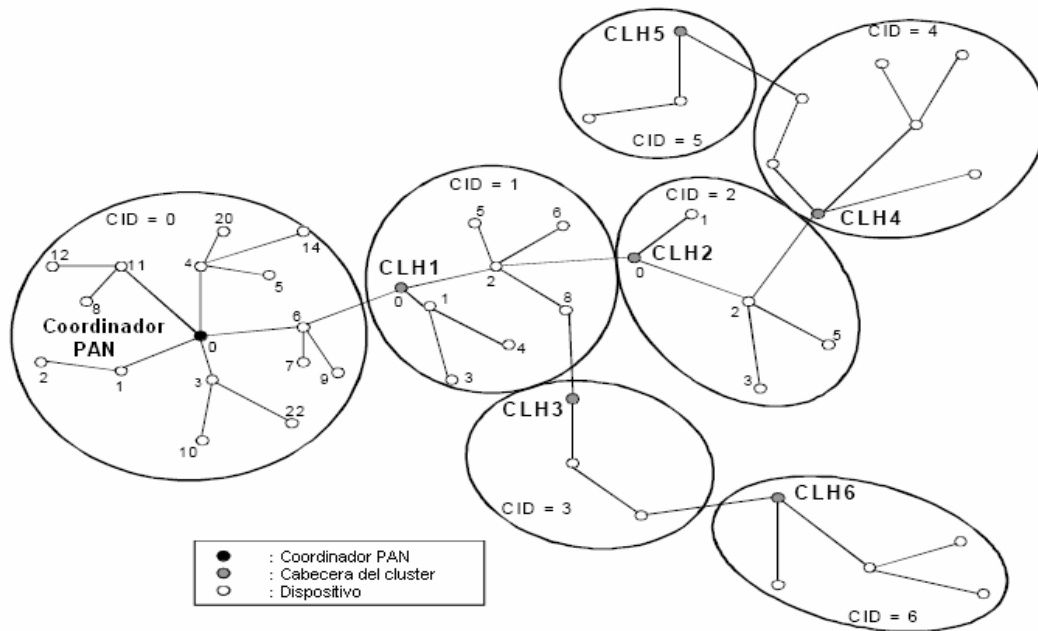


Figura 2-3. Red en malla 802.15.4

2.1.3 Redes en Malla IEEE 802.15.5

Pese a que en el estándar IEEE 802.15.4 se realiza una descripción de la formación de la malla, aún existen varios aspectos que no se consideran en él y no permiten un correcto funcionamiento de esta topología, que es esencial para lograr un amplio rango de cobertura con dispositivos de bajo consumo de energía.

Con el fin de solucionar los problemas existentes en este campo, en noviembre de 2003 se creó el Grupo de Trabajo 5 (*Task Group, TG5*) de WPAN, cuyo objetivo principal es determinar los mecanismos necesarios que deben estar presentes en los niveles físico y MAC de las WPANs para habilitar la topología de malla, teniendo en cuenta que este tipo de topología proporciona:

- Extensión a la cobertura de red sin necesidad de incrementar la potencia de transmisión o la sensibilidad del receptor.
- Incremento en la confiabilidad de la red a través de la redundancia en las rutas.
- Facilidad en la configuración de la red.
- Aumento del tiempo de vida de las baterías del dispositivo.

La topología de malla por lo tanto, mejora la versatilidad y funcionalidad de los dispositivos WPAN convencionales extendiendo los servicios inalámbricamente como una alternativa para incrementar la potencia de transmisión.

El proyecto aclara que una red en malla puede utilizar un esquema de malla total o parcial. En una topología de malla total, cada nodo se conecta directamente con los otros mientras que en una topología de malla parcial existen dos tipos de nodos, los que se conectan a todos los otros nodos y aquellos que se conectan sólo a los nodos con los que intercambian la mayoría de la información.

La red en malla 802.15 para WPAN estará disponible para dispositivos de corto alcance y no se restringe a los puntos de acceso como es el caso del borrador del estándar 802.11s (que se explicará con más detalle en la sección 2.2.2), ni se limita a una sola entidad administrativa lógica para la seguridad. Adicionalmente, las redes 802.11 operan principalmente en modo infraestructura, haciendo necesario el uso de un punto de acceso conectado a una red IP.

La gran cantidad de miembros del grupo de estudio de las WPAN demuestran el interés en el desarrollo de la topología de malla de las WPAN. Entre los miembros se encuentran industrias inalámbricas líderes en el mercado internacional, investigadores académicos, fabricas de semiconductores,

integradores de sistemas y usuarios finales. Ya existen en la actualidad algunos consorcios industriales como WiMedia, ZigBee y la Alianza para la Interconexión Inalámbrica Industrial (*Wireless Industrial Networking Alliance*, WINA) que se relacionan activamente con los requisitos de las redes WPAN y promueven el concepto de las redes en malla.

En enero de 2004 se publicó el documento para la Solicitud de Autorización del Proyecto (*Project Authorization Request*, PAR) y la definición de los 5 criterios, en el cual se especificó que el proyecto tendría como objetivo proporcionar las prácticas recomendadas para la provisión de un ambiente de trabajo (*framework*) arquitectural que permita a los dispositivos WPAN promover topologías de malla inalámbricas interoperables, estables y escalables y si es necesario, proporcionar el texto de reforma requerido para implementar esta práctica recomendada a los actuales estándares WPAN.

Después de un tiempo considerable de inactividad del TG5, en marzo de 2006 se logró crear una primera versión del borrador (*draft*) con los documentos de base existentes. Sin embargo, en la reunión realizada en julio de 2006 se hizo un llamado para contribuciones adicionales con el propósito de complementar el actual borrador. Lo cual permite observar que el proceso de estandarización de este nuevo estándar puede tardar todavía mucho tiempo.

A partir del anterior estudio del estado actual de la tecnología ZigBee en cuanto al tratamiento de las redes en malla es posible observar que aunque la tecnología 802.15.4 define una topología de malla, no implementa los mecanismos necesarios a nivel físico y MAC para su correcto funcionamiento, por lo cual se ve la necesidad de hacer modificaciones adicionales al actual estándar. Sin embargo, el desarrollo del estándar que implementa dichas modificaciones es lento y pausado por lo que puede pasar mucho tiempo para lograr el despliegue efectivo de este tipo de redes.

Por otro lado, las ventajas de reducción de costos y conservación de energía que presenta esta tecnología pueden resultar muy provechosas para la implementación de redes en entornos rurales que por lo general exigen soluciones de bajo costo, no obstante, el campo de aplicación de estas redes se orienta hacia la transmisión de señales de bajo ancho de banda y baja velocidad, por lo cual se deduce que este tipo de tecnología no sería muy adecuada para el transporte de VoIP en un entorno rural, dado que el ancho de banda requerido para este fin es superior al que alcanza la tecnología y pese a que se podría lograr alguna aproximación, la eficiencia de la red se reduciría a medida que el tamaño de la red aumenta.

Con el fin de buscar una mejor solución para el propósito de este proyecto, a continuación se presenta el estudio de las capacidades y alcances del estándar IEEE 802.11 en cuanto al tratamiento de la malla.

2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.11

El propósito de este estándar es proporcionar conectividad inalámbrica a equipos, maquinaria automática o estaciones que requieren un despliegue rápido y pueden ser portátiles o estar montados sobre vehículos dentro de un área local. Este estándar también ofrece a los cuerpos reguladores, un medio para estandarizar el acceso de una o más bandas de frecuencia para la comunicación en un área local.

El estándar IEEE 802.11 [33] define los protocolos y la interconexión compatible de equipos de comunicación de datos a través del aire, vía radio o infrarrojo, dentro de una LAN, utilizando un protocolo de acceso múltiple CSMA/CA. El control de acceso al medio soporta la operación de un AP mediante control así como también entre estaciones independientes. El protocolo incluye los servicios de autenticación, asociación y reasociación, un procedimiento opcional de codificación/decodificación, manejo de la potencia para reducir el consumo de energía en estaciones móviles y una función de coordinación puntual para la transferencia de datos con un tiempo limitado.

El estándar original de este protocolo se aprobó en 1997 con el nombre de IEEE 802.11 y define dos tipos de interfaces físicas: una infrarroja que maneja velocidades de datos de 1 Mbps con una extensión opcional de 2 Mbps, y una implementación vía radio en la que se define un mecanismo de Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*, FHSS) que soporta velocidades de datos de 1 Mbps y 2 Mbps (opcional) o un mecanismo de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS) que soporta velocidades de datos de

1 y 2 Mbps. Aunque la interfaz infrarroja sigue siendo parte del estándar en el momento no hay implementaciones disponibles. Actualmente, a este estándar se lo conoce como 802.11 *Legacy*.

Desde que el estándar se creó hasta hoy, muchos grupos de trabajo se han creado para mejorar las deficiencias detectadas en él, así como para mejorar algunas de sus prestaciones.

La primera modificación apareció en 1999 y se denominó IEEE 802.11b, esta especificación soporta velocidades de 5 hasta 11 Mbps, utiliza el mismo método de acceso CSMA/CA definido en el estándar original y trabaja en la frecuencia de 2,4 GHz.

En el mismo año, se aprobó la especificación denominada IEEE 802.11a que opera sobre una frecuencia de 5 GHz con una velocidad máxima de 54 Mbps. Esta especificación utiliza el mismo juego de protocolos de base que el estándar original y la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM). El uso de la banda de frecuencia de 5 GHz representa una ventaja de este estándar, dado que se presentan menos interferencias. Sin embargo, la utilización de esta banda también tiene sus desventajas, debido a que un equipo del estándar 802.11a no puede interoperar con equipos 802.11b, excepto si se dispone de dispositivos que implementen ambos estándares.

Posteriormente, se incorporó una extensión del estándar 802.11b denominada IEEE 802.11g que utiliza la banda de 2.4 GHz (al igual que el estándar 802.11b) pero opera a una velocidad teórica máxima de 54 Mbps, similar a la del estándar 802.11a. En la actualidad la mayoría de productos son de la especificación b y g, y en el caso del estándar 802.11a frecuentemente se encuentran equipos con soporte para las tres tecnologías a, b y g.

Otros estándares de esta familia son mejoras de servicio y extensiones o correcciones a especificaciones anteriores. Una lista detallada de estas mejoras se muestra en el Anexo A.

El estándar 802.11 y sus derivados se han desarrollado ampliamente en escenarios de LAN comerciales, gubernamentales y residenciales y en algunas aplicaciones en redes de servicio público, principalmente *HotSpots*⁷, proporcionando cobertura del rango de cientos de metros.

En los últimos años se ha producido una gran actividad de investigación entorno a la tecnología de las redes inalámbricas en malla, la cual se define en la especificación IEEE 802.11s, y se encuentra en estatus de borrador, pues se piensa que este tipo de configuración puede traer grandes ventajas en la reducción de costos y flexibilidad en la implementación de las redes. Por tal razón, muchos fabricantes comenzaron a lanzar productos con tecnologías propietarias, tratando de apoderarse del mercado lo antes posible, antes que se publique la especificación final del estándar que pretende reemplazar todas estas tecnologías propietarias.

Como se estudiará de manera más detallada en la sección 2.2.2 del presente capítulo, el estándar 802.11s ofrece la flexibilidad requerida para satisfacer los requerimientos de ambientes residenciales, de oficina, campus, rurales, seguridad pública y aplicaciones militares. La propuesta se enfoca sobre múltiples dimensiones: el subnivel MAC, enrutamiento, seguridad e interconexión. El borrador especifica plataformas para equipos de simples y múltiples canales de radio así como esquemas de priorización de calidad de servicio (802.11e), medición de recursos de radio (802.11k) y administración del espectro (802.11h). La especificación también incluye características tales como: sensado adaptativo de portadora para el reuso espacial del espectro, coordinación de canales de acceso y soluciones de administración de recursos de radio frecuencia (RF). El 802.11s también provee características de descubrimiento extendido de mallas con autoconfiguración automática y seguridad (802.11i).

⁷ Un HotSpot es un punto de acceso inalámbrico público donde los usuarios pueden conectarse a Internet; se puede encontrar de forma gratuita o pagando una tarifa por el acceso.

2.2.1 Componentes de la Arquitectura IEEE 802.11

Una LAN 802.11 se basa en una arquitectura celular en la que el sistema se subdivide en celdas llamadas Conjuntos de Servicios Básicos (*Basic Service Set, BSS*) y cada una de ellas se controla por una estación base llamada punto de acceso.

Aunque una WLAN puede constituirse por una sola celda en la cual se comunican directamente dos estaciones sin necesidad de un AP, lo cual se denomina un BSS independiente (*Independent Basic Service Set, IBSS*) o una red *ad hoc*, la mayoría de las redes se forman por varias celdas en las que los APs se conectan a través de un tipo de *backbone* llamado Sistema de Distribución (*Distribution System, DS*) que puede ser *Ethernet* o inalámbrico (en este último caso recibe el nombre de WDS).

Toda la WLAN interconectada, incluyendo las diferentes celdas, sus respectivos APs y el sistema de distribución es vista por los niveles superiores del modelo OSI como una sola red 802 y se llama Conjunto de Servicios Extendidos (*Extended Service Set, ESS*).

La Figura 2-4 [34] muestra una red de área local inalámbrica 802.11 con sus respectivos componentes.

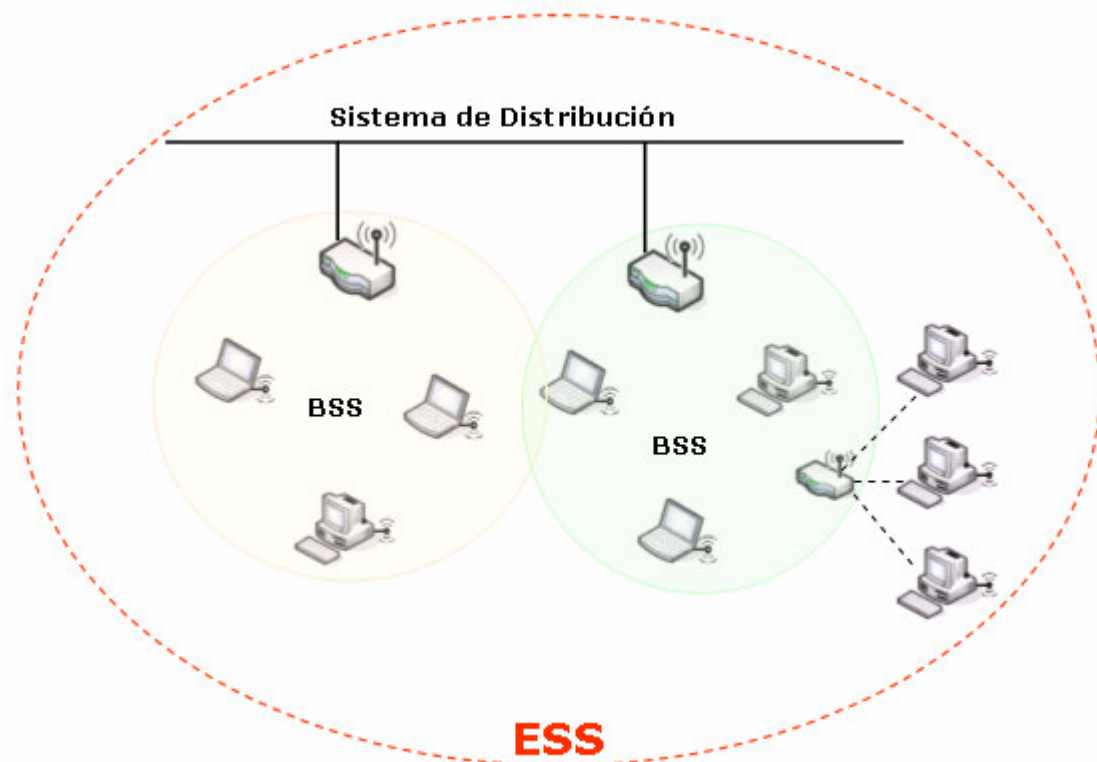


Figura 2-4. Arquitectura WLAN 802.11

El estándar también define el concepto de un portal como aquel dispositivo que interconecta una LAN de 802.11 con otra LAN de 802. El portal proporciona la integración lógica entre la arquitectura IEEE 802.11 y las redes LAN cableadas. Este concepto es una descripción abstracta de una parte de la funcionalidad de un Puente de Desplazamiento (*Translation Bridge*).

Aunque el estándar no necesariamente lo requiere, las redes más comunes tienen el AP y el portal en una sola entidad física.

2.2.2 Redes en Malla IEEE 802.11s

Actualmente el estándar IEEE 802.11 domina la industria mundial de redes de área local inalámbricas, sin embargo, como pudo observarse en la sección 1.6 del capítulo 1, los mecanismos existentes para el

modo *ad hoc* 802.11 son insuficientes para implementar redes con múltiples saltos y en malla, debido a sus limitaciones en cuanto a la interconexión con otro tipo de redes, la falta de protocolos de enrutamiento robustos y escalables o la imposibilidad de implementar múltiples interfaces para el transporte del tráfico. Por esta razón, en noviembre de 2003 se creó un nuevo grupo de trabajo denominado TGs, que se encarga de trabajar en el proceso de definición de los procedimientos necesarios para construir un ESS IEEE 802.11 con una configuración de malla, compuesto por un conjunto de APs interconectados con enlaces inalámbricos que permitan crear una topología automática de aprendizaje y una configuración dinámica del trayecto, lo cual se logra cuando cada uno de los nodos de la red puede reconocer, sin necesidad de un nodo coordinador, todos los posibles trayectos que lo enlazan a sus vecinos (propiedad de auto aprendizaje) y ante la falla de un enlace es capaz de identificar nuevas rutas y reestablecer la comunicación (propiedad de auto configuración).

El estándar IEEE 802.11-1999 (edición 2003) proporciona un formato de trama de cuatro direcciones para el intercambio de paquetes entre APs con el propósito de crear un WDS, pero no define cómo configurar o utilizar el WDS. El propósito del TGs es proporcionar un protocolo para trayectos auto configurables entre APs sobre topologías de multitrayecto en un WDS que soporte tráfico *broadcast/multicast*⁸ y *unicast*⁹ en un ESS en configuración de malla, utilizando el formato de trama de cuatro direcciones o una extensión de éste. Los trayectos entre APs serán auto configurables lo que implica una interoperabilidad a nivel de AP y para lograr una mayor eficiencia en la malla, la mejora permitirá el uso de uno o más radios en cada AP.

La propuesta de mejora será una extensión al nivel MAC IEEE 802.11 y definirá la arquitectura y los protocolos necesarios para proporcionar un ESS basándose en el estándar IEEE 802.11 en configuración de malla similar en su funcionamiento a un ESS cableado, con respecto a la relación de las estaciones con el BSS y ESS.

Este nuevo estándar permitirá la formación y operación interoperable de un ESS en malla, pero podrá extenderse para adicionar métricas de selección de trayecto alternativas y/o protocolos de acuerdo a los requisitos de la aplicación. Una configuración ideal del ESS en malla puede constituirse hasta por 32 dispositivos actuando como APs transmisores. Sin embargo, otras configuraciones de mayor alcance también pueden contemplarse por el estándar. Se espera que la arquitectura definida por la mejora permita un ESS en malla que interactúe con los niveles más altos y se conecte con otras redes utilizando los protocolos de los niveles más altos.

Este proyecto utilizará mecanismos de seguridad IEEE 802.11i, o una extensión de ellos, con el propósito de asegurar un ESS en malla en la que todos los APs se controlen por una sola entidad administrativa lógica de seguridad.

Siguiendo el proceso de estandarización del 802.11s, en junio de 2005 finalizó la Llamada para Propuestas (*Call For Proposals*, CFP) con 15 propuestas recibidas, en la reunión de julio de 2005 el número de propuestas se redujo a 6 y después de septiembre de 2005 sólo 4 propuestas permanecieron en la tabla con grupos de trabajo. Finalmente, en la reunión de enero de 2006 sólo las propuestas de SEE Mesh [35] y Alianza Wi-Mesh [36] permanecieron activas y en el marco de esta reunión se presentó una sola propuesta para unir los intereses de cada una en ella. Esta fusión tuvo éxito en la última reunión realizada en marzo de 2006 donde se presentó la propuesta conjunta que se constituye en el punto de partida para el desarrollo del estándar 802.11s. Las empresas que conforman las propuestas SEE Mesh y Alianza Wi-Mesh se muestran en la Tabla 2-1.

⁸ Multidifusión. Técnica que permite que copias de un solo paquete se transfieran a un subconjunto seleccionado de todos los posibles destinos.

⁹ Comunicación establecida entre un solo emisor y un solo receptor en una red

TABLA 2-1. ACTUALES PROPUESTAS DEL IEEE 802.11S

Propuesta	Empresas
SEE Mesh (Simple, Efficient and Extensible Mesh)	Intel, Nokia, Motorola, NTT DoCoMo y Texas Instruments
Alianza Wi-Mesh (WiMA)	Accton Technology, ComNets, InterDigital Communications, NextHop Technologies, Nortel, Philips, Extreme Networks, MITRE, Naval Research Laboratory, Swisscom Innovations y Thomson

A partir de la propuesta conjunta realizada en marzo, se creó la primera versión del borrador denominada *Draft DO.01*, sobre la cual se está trabajando en el momento.

Como puede observarse, el grupo de trabajo TGs de WLAN ha logrado mayores avances que el grupo de trabajo TG5 de WPAN. Por esta razón, a continuación se presenta un resumen de la propuesta conjunta realizada por las alianzas SEE Mesh y Wi Mesh que permite observar de manera más detallada el comportamiento de una red inalámbrica en malla.

2.2.2.1 Propuesta conjunta de SEE Mesh y Wi Mesh para el 802.11 TGs [14]

- **Fundamentos de la arquitectura de malla WLAN**

La arquitectura propuesta en esta especificación divide los nodos inalámbricos en dos clases: Los nodos "malla" (MP) que son nodos capaces de soportar servicios de malla y los nodos "no malla" que son simples estaciones cliente (STA). Los nodos malla también pueden opcionalmente soportar servicios de AP (MAP) y pueden ser controlados o no controlados.

Los servicios de malla pueden implementarse como una interfaz MAC lógica que es independiente de la antigua interfaz MAC 802.11. De esta manera, un dispositivo puede actuar en los roles de un punto de malla y AP o en los roles de un punto de malla y una STA convencional.

Un ejemplo de una malla WLAN se muestra en la Figura 2-5 [14], en donde se observa que cualquier dispositivo que soporte los servicios de malla se denomina Punto de Malla (MP) el cual puede ser un dispositivo de infraestructura dedicada o un dispositivo de usuario que tiene la capacidad de participar en la formación y operación de la red en malla. Un tipo especial de punto de malla es el Punto de Acceso a la Malla (MAP) que proporciona servicios de AP además de los servicios de malla. En la figura se puede observar como una simple STA se asocia a un MAP para acceder a la red en malla, sin embargo, esta STA no participa en los servicios de la malla WLAN tales como la selección del trayecto y el reenvío de la información.

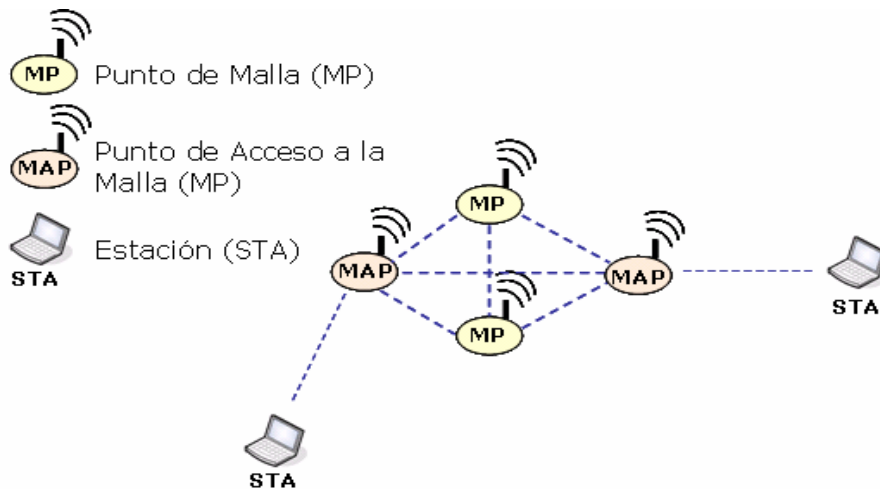


Figura 2-5. Malla WLAN con sus diferentes tipos de dispositivos

Los puntos de malla pueden operar en varios niveles de funcionalidad pues no necesitan hacer uso de todos los servicios de malla. Por tal motivo, servicios como el enrutamiento pueden utilizarse parcialmente o no utilizarse para nada. Las siguientes dos subsecciones presentan dos niveles de funcionalidad de los MPs.

- **Operación liviana del punto de malla:** Esta es la mínima funcionalidad de un punto de malla en la cual no se utiliza o se proporciona el sistema de distribución y los servicios de control de congestión, pero si se soportan y proporcionan todos los otros servicios de malla obligatorios para un punto de malla que no es un MAP.

Con este tipo de operación los MPs pueden comunicarse únicamente con sus vecinos por lo cual su implementación es extremadamente liviana. Para adoptar esta funcionalidad los MPs pueden fijar sus archivos de enrutamiento en "null" con lo cual informarán a sus vecinos que no están disponibles para proporcionar los servicios de distribución. La opción de no utilizar el servicio de DS no exige alguna modificación en la especificación de los servicios de malla.

- **Soporte de dispositivos de conservación de energía en una malla WLAN:** La necesidad de Conservación de Energía (*Power Save*, PS) en un ambiente de malla depende en específico del escenario de operación. En ciertos escenarios en donde todos los MPs son MAPs o sólo se lleva el tráfico de *backbone*, no puede esperarse que los dispositivos tengan una potencia limitada, por el contrario, se espera que los MAPs estén despiertos todo el tiempo. Sin embargo, en escenarios con MPs que tengan una operación liviana y no retransmitan la información, la conservación de energía puede ser ventajosa, es por esto que la funcionalidad de conservación de energía es propuesta como una característica opcional en esta especificación.

En el caso que un vecino de un MP no soporte la funcionalidad de conservación de energía, el MP que si la soporta puede tomar dos decisiones, puede escoger no comunicarse con el vecino en particular y seguir con su operación de conservación de energía o puede escoger no utilizar el mecanismo y continuar la comunicación con su vecino. Por lo tanto, un MP que soporte esta funcionalidad puede rechazar una solicitud de asociación de otros MPs si estos no soportan la misma funcionalidad y en efecto, el MP sólo puede operar en este modo si todos los otros MPs que se asocian a él también lo soportan.

En algunos escenarios los dispositivos también pueden escoger operar en el modo STA y utilizar el servicio de conservación de energía antiguo, que se proporciona a través de otro AP. Tal escenario es particularmente atractivo en el caso en que el soporte de conservación de energía no está disponible para los puntos de malla vecinos pero un MAP está disponible en la vecindad. Cabe notar que la opción de ser un dispositivo de tipo malla o no serlo puede escogerse dinámicamente, por ejemplo, una cámara podría configurarse a si misma como un dispositivo de tipo malla cuando se alimente con corriente alterna y configurarse como un simple cliente STA cuando se alimente con una batería.

- **Operación multicanal de la malla WLAN**

Una malla WLAN puede operar sólo en un canal de una manera sencilla, pero si se desea operar en múltiples canales los dispositivos necesitan tener múltiples radios o capacidades para la conmutación de canales, con lo cual es posible ajustar cada interfaz de radio a un canal diferente o cambiarse dinámicamente a otro canal disponible por un corto periodo de tiempo. A continuación se presenta una descripción de la operación multicanal en las redes en malla.

- **Interfaces de canales RF y gráficas de canales unificados:** La topología de una red en malla WLAN puede incluir puntos de malla con una o más interfaces de radio y puede utilizar uno o más canales para realizar la comunicación entre los MPs. Cuando un MP no tiene soporte para la conmutación de canales, cada interfaz de radio del MP opera en un canal al tiempo, pero los canales pueden cambiar durante el periodo de vida de la red en malla de acuerdo a los requerimientos de la Selección Dinámica de Frecuencia (*Dynamic Frequency Selection*, DFS). Asimismo, el esquema de selección del canal que se utiliza en una red en malla WLAN también puede variar de acuerdo a las diferentes topologías y requisitos de la aplicación. La Figura 2-6 [14] ilustra tres ejemplos de esquemas de asignación de canales en los puntos de malla, la

Figura 2-6 (a) muestra un caso de despliegue simple con puntos de malla de una sola interfaz que utilizan un canal único a lo largo de la red en malla. Las Figuras 2-6 (b) y (c) muestran dos esquemas avanzados de asignación de canales en los cuales uno o más puntos de malla tienen una o más interfaces de radio y se utiliza más de un canal a lo largo de la red en malla. En este sentido, la propuesta define un protocolo que le permite a varios puntos de malla con radio interfaces unirse a un solo canal de comunicación, sin embargo, la propuesta presenta también la flexibilidad suficiente para permitir la implementación de muchos otros esquemas avanzados de asignación de canales convenientes para aplicaciones más específicas.

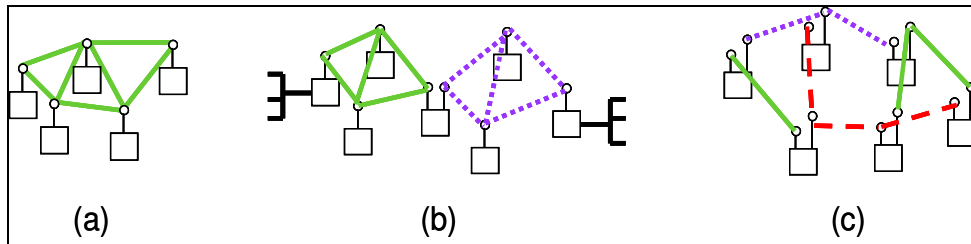


Figura 2-6. Ejemplo de configuración de canales en una malla WLAN

Puede notarse que en cada una de las topologías de la Figura 2-6, dos o más puntos de malla con sus interfaces de radio se conectan a otras interfaces utilizando un canal común, esto se define como una Gráfica de Canal Unificado (*Unified Channel Graph, UCG*) y es claro que un mismo dispositivo puede pertenecer a diferentes UCGs.

Como se observa en la Figura 2-7 [14], una red en malla con un único canal tiene sólo un UCG, mientras topologías más sofisticadas pueden incluir múltiples UCGs. Por su parte, esta propuesta proporciona un *framework* para la conmutación coordinada del canal que se utiliza dentro de una UCG, cuando es necesario que el canal esté cambiando en la red en malla, debido por ejemplo, a los requerimientos de las normas de DFS. Cada UCG en la malla WLAN comparte un valor común de precedencia del canal que puede utilizarse para combinar o cambiar el canal en el *cluster*¹⁰.

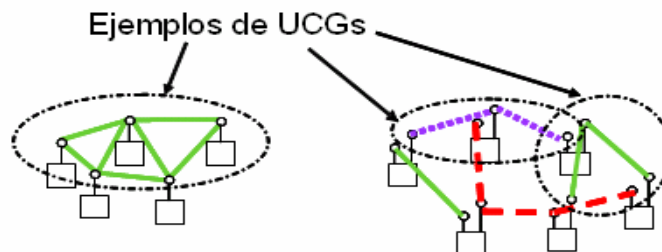


Figura 2-7. Ejemplos de gráficas de canales unificados en una malla WLAN

- **Framework de canal común:** El *Framework* de Canal Común (*Common Channel Framework, CCF*) permite la operación multicanal de dispositivos con una o múltiples interfaces de radio. La base de este *framework*, es el canal común en una UCG. Para dispositivos antiguos (STAs y AP) y MPs que no tienen soporte para CCF, el canal común aparece como cualquier otro canal 802.11 y sus operaciones permanecen sin afectarse de ninguna manera.

Cuando un par de dispositivos o *clusters* utilizan el CCF seleccionan un canal diferente y cambian a este canal por un corto periodo de tiempo, después del cual retornan al canal común. Durante este tiempo, los dispositivos intercambian una o más tramas de datos. La propia coordinación del canal se lleva a cabo en el canal común intercambiando tramas de control o tramas de gestión que llevan la información sobre el canal de destino. Gracias a esto, es posible lograr transmisiones simultáneas sobre múltiples canales lo que a su vez resulta en un incremento del desempeño.

¹⁰ En este caso, el *cluster* puede definirse como un conjunto de MPs que operan sobre un rango de cobertura común.

La capacidad de conmutar el canal dentro de un tiempo predeterminado permite que un MP con una sola interfaz de radio pueda operar en ambientes multicanal sin necesidad de tener múltiples interfaces de radio. En la primera oportunidad, la conmutación del canal se restringe a aquellos canales que están generalmente inactivos. Los dispositivos que soportan el CCF para la operación multicanal, indican este uso en el campo denominado *multi-channel capability* presente en el Elemento de Información (*Information Element, IE*) de las capacidades de la malla WLAN. De esta manera, dos nodos que tienen soporte para la capacidad de multicanal pueden comunicarse a través del CCF.

Dentro del CCF, la operación multicanal para MPs con radio único se facilita definiendo una Ventana de Coordinación del Canal (*Channel Coordination Window, CCW*) que se repite constantemente con un periodo de repetición P. Como se observa en la Figura 2-8 [14], los MPs que puedan utilizar el CCF se sintonizarán a un canal común en el inicio de cada CCW, una vez situados en este canal un MP puede iniciar una transmisión enviando una trama de Solicitud de Cambio (*Request To Switch, RTX*) que contiene la información del canal de destino sobre el cual se establecerá la comunicación, el MP de destino por su parte, aceptará esta solicitud enviando una trama de Listo para Cambiar (*Clear To Switch, CTX*) que contiene el mismo canal de destino, y posteriormente transmitirán las tramas de datos en el canal seleccionado durante la CCW. Después de la transmisión satisfactoria de los datos, los MP retornarán al canal común. Sin embargo, los MPs pueden continuar intercambiando tramas RTX y CTX incluso después de la CCW e indicar el canal de destino al cual deben saltar.

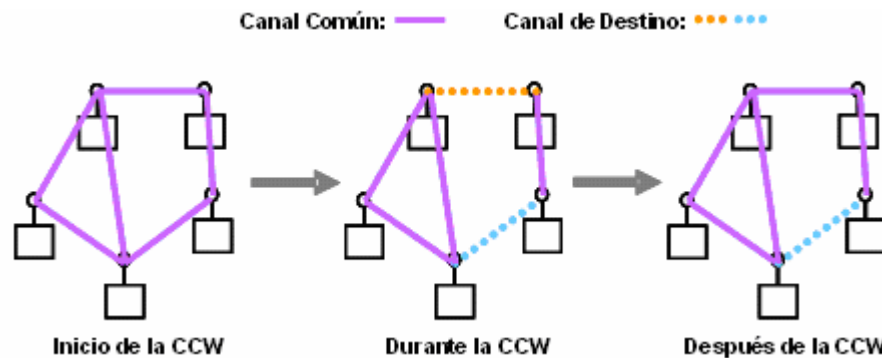


Figura 2-8. Operación multicanal de dispositivos con un solo radio basados en el CCF

A partir de este procedimiento, los MPs pueden seleccionar diferentes canales de destino y llevar a cabo transmisiones simultáneas en estos canales durante la CCW y después de ella. Los parámetros P y CCW se distribuyen sobre el canal común utilizando el elemento de información de la capacidad de la malla presente en los *beacons*.

El CCF facilita la canalización entre el tráfico del BSS y el tráfico WDS en el cual un MAP puede cambiar al canal del BSS después de la CCW, permitiendo por consiguiente, que el MAP maneje el tráfico WDS así como el tráfico de la BSS. El *framework* también facilita la canalización dentro del WDS para permitir, por ejemplo, la formación de *clusters ad hoc* que se cambian al canal convenido después del CCW.

- **Selección del canal común:** Cuando se selecciona el canal común, hay varios aspectos que se deben tener en cuenta:
 - Si múltiples dispositivos se activan simultáneamente, seleccionarán aleatoriamente los canales iniciales (mientras no todos ellos puedan verse con los otros al tiempo) lo cual genera una red desarticulada. Por esta razón, se requiere de un proceso que utilice el descubrimiento de los medios existentes para que los nodos puedan cambiar el canal de una manera controlada y la malla vuelva a unirse y quede completamente conectada.
 - Con el propósito de cumplir con los requisitos regulatorios impuestos en algunas bandas de frecuencia (por ejemplo, en la banda de 5 GHz) y para realizar la DFS evitando las posibles interferencias, se requiere que la malla se encuentre formada completamente. El proceso de DFS debe controlarse de manera global de tal manera que desde el punto de vista de la

STA, su comportamiento esté acorde con las especificaciones del estándar 802.11h, es decir, las STAs no deben requerir de un protocolo en particular.

- En algunos tipos de redes, la elección del canal puede realizarse por un nodo administrador o un algoritmo avanzado de asignación de canal, esto permite utilizar una consola de dirección o una aplicación para especificar los canales o los rangos de canales.

Esta funcionalidad puede llevarse a cabo por medio de indicadores de precedencia del canal. En este proceso, un nodo no controlado selecciona un número aleatorio (su indicador de precedencia local) y lo incluye junto con *beacons* y mensajes de respuesta de prueba, mientras un nodo controlado selecciona un valor al azar o tiene uno especificado; los rangos de valores para los nodos no controlados y controlados no deben superponerse y en efecto, los nodos controlados siempre tienen valores más altos. Cada nodo mantiene el valor del indicador de precedencia más alto que se conoce en la red y todos los nodos identificarán el mismo valor. Este valor es el indicador de precedencia del canal e indica un valor de precedencia para la malla, el cual se emite en *beacons* por todos los puntos de malla. Cuando dos o más redes desarticuladas (que comparten el mismo identificador de malla) se descubren entre sí, la que tiene el valor de precedencia más bajo cambia de canal con el fin de unirse a la otra red.

Este mecanismo básico se extiende entonces para justificar el hecho de que es posible para los nodos tener más de una interfaz de radio, lo cual significa que un punto de malla puede extenderse a más de un canal de comunicación. En este caso, cada interfaz de radio puede tener su propio espacio de indicador de precedencia del canal, es decir, un indicador de precedencia del canal diferente para cada canal. Estos factores se tienen en cuenta en la selección del canal y en la determinación del indicador de precedencia del canal.

- **Interconexión de mallas WLAN con otros tipos de redes**

Una red en malla WLAN es una red de nivel 2 que funciona como una LAN IEEE 802 tradicional, lo cual significa que otras redes y protocolos de alto nivel verán su funcionamiento de manera similar al de una transmisión *Ethernet*. Así, puede parecer como si todos los MPs y MAPs en la malla WLAN se conectan directamente en el nivel de enlace. Los protocolos descritos en la propuesta del TGs escoden los detalles de estas funcionalidades a los protocolos de alto nivel para proporcionar de manera transparente la entrega de datos *broadcast* y *unicast* multitrayecto en el nivel 2 dentro de la malla.

- **Interconexión general:** Para que una malla WLAN pueda comportarse como una LAN 802.11 tradicional debe poder interconectarse con otras redes utilizando el nivel 2 como puente y el nivel 3 para la interconexión. La Figura 2-9 (a) [14] muestra un ejemplo de red en el cual dos redes en malla se conectan a través de segmentos LAN 802.3. En este ejemplo, cada punto de malla se coloca junto con un nuevo elemento denominado Punto de Malla con Portal (*Mesh Point Portal*, MPP) que se encarga de interconectar la malla a otra LAN utilizando los protocolos estándar de interconexión como por ejemplo, 802.1D. Esta configuración crea efectivamente una subred LAN lógica de nivel 2 que contiene ambas redes y los dos segmentos LAN 802.3. Por su parte, la figura 2-9 (b) ilustra un ejemplo de red en la cual dos redes en malla se interconectan con dos segmentos LAN 802.3 utilizando enrutamiento del nivel 3 (por ejemplo IP). En este ejemplo, los MPPs realizan la funcionalidad de puentes enrutadores IP y la red se forma como la interconexión de múltiples subredes LAN. Por lo tanto puede observarse que un MPP puede funcionar en el nivel 2 como un puente de interconexión o en el nivel 3 como un enrutador de frontera.

Finalmente, a partir de la figura 2-9 (c) se deduce que una o más redes 802.11s pueden interconectarse entre sí a través de estos portales, lo cual puede ser útil cuando diferentes mallas están trabajando con diferentes protocolos de enrutamiento o se configuran de manera diferente.

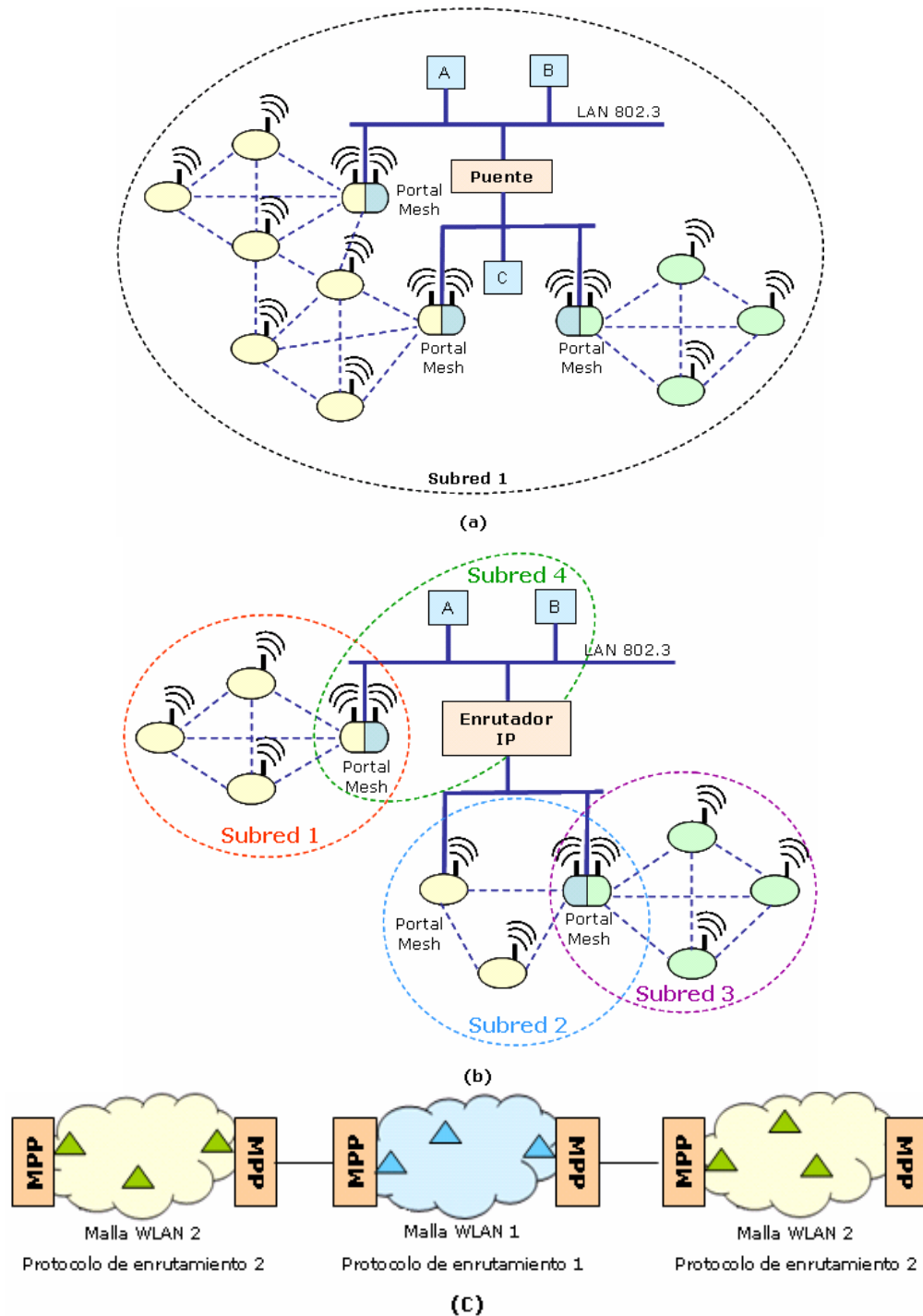


Figura 2-9. Interconexión de una malla WLAN con otras LAN. (a) Puente de nivel 2. (b) Interconexión de nivel 3. (c) Interconexión de mallas 802.11s a través de MPPs

- **Modelo de referencia para la interconexión de mallas WLAN**

Como se muestra en la Figura 2-10 [14], la entidad MAC 802.11s aparece como un solo puerto a un puente repetidor 802.1D o a un enrutador de nivel 3. Los portales de la malla 802.11s exponen el comportamiento de la malla al estilo de un segmento LAN 802 y por lo tanto, la malla se muestra como un solo segmento LAN de emisión para el puente repetidor 802.1D y los niveles más altos.

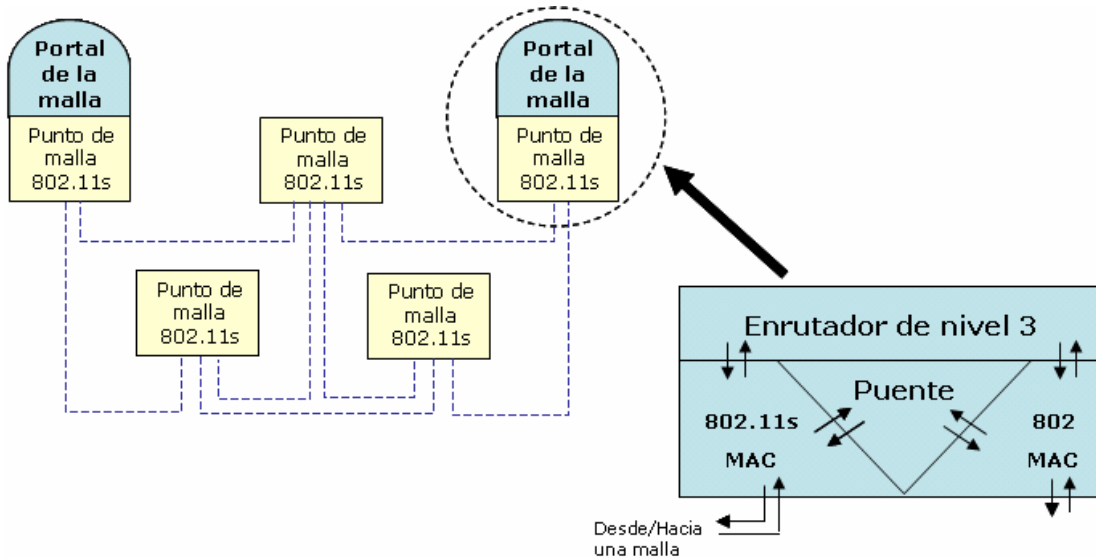


Figura 2-10. Modelo de referencia para la interconexión de mallas WLAN

A partir de este modelo de interconexión un usuario puede construir redes que incluyan tanto mallas WLAN como otras redes de nivel 2, pues cada MPP puede participar en un protocolo de expansión de árbol y mantener una tabla de los nodos para determinar a través de cual puerto de cada nodo en la red lógica puede alcanzarse.

Si se desea transmitir mensajes *unicast* es necesario como primera medida determinar si el nodo de destino está dentro o fuera de la malla. Si el destino está dentro de la malla, el nodo de la malla seleccionará una ruta en la malla para su conexión; pero si está fuera de la malla, el paquete se transmitirá a todos los puntos de malla con portal (MPP) hasta que se identifique el MPP que contiene el nodo de destino, al cual se le entregarán finalmente los paquetes a través de mensajes *unicast*.

- **Transporte de datos MAC sobre la malla WLAN**

Como se observa en la Figura 2-11 [14], la malla WLAN es transparente para los protocolos de alto nivel debido a que el comportamiento interno del nivel 2 de la malla se esconde a los protocolos de alto nivel dentro del Punto de Acceso al Servicio (*Service Access Point, SAP*) del MAC.

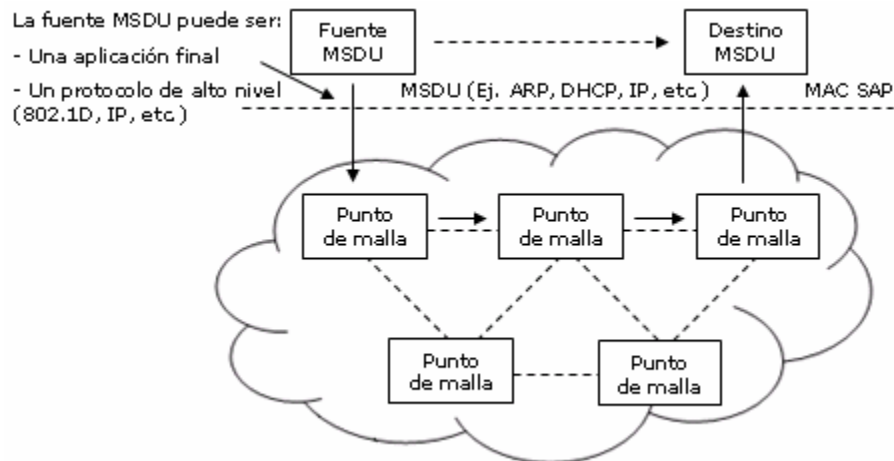


Figura 2-11. Transporte de datos MAC sobre la malla WLAN

- **Formato de tramas MAC**

- **Tramas de datos de la malla:** Las tramas de datos que se transmiten desde un MP a otro utilizan como base el formato de tramas de 4 direcciones definido por el estándar IEEE 802.11-

1999, pero extienden este formato con un campo de encabezado de QoS que sigue el método de Acceso de Canal Distribuido Mejorado (*Enhanced Distributed Channel Access, EDCA*) definido por el estándar IEEE 802.11e y un nuevo campo de encabezado de control de reenvío en malla. Por lo cual, el nuevo formato de trama se compone de los campos que se muestran en la Figura 2-12 [14].

Bytes: 2	2	6	6	6	2	6	2	3	02312	4
Control de Trama	Duración	Dirección 1	Dirección 2	Dirección 3	Control de Secuencia	Dirección 4	Control de QoS	Control de reenvío en la malla	Cuerpo	FCS
Encabezado MAC										

Figura 2-12. Formato de trama MAC de la malla

Para que este nuevo formato de trama pueda trabajar perfectamente en la topología de malla, también es necesario adicionar o modificar algunas características en cada uno de los campos que conservan el formato del estándar base IEEE 802.11-1999. Es así como por ejemplo, el campo de control de trama permite identificar entre otras cosas, la función de la trama por medio de los subcampos tipo y subtipo; en el estándar 802.11 se detalla que hay tres tipos de tramas: de control, de datos y de gestión, y estas tramas contienen varios subtipos. Además, existe una tabla en el estándar base 802.11-1999 (Tabla 1—Combinaciones válidas de tipos y subtipos [33]) donde se muestran las combinaciones válidas de tipos y subtipos y es en dicha tabla donde se debe adicionar las siguientes filas definidas para el trabajo de las redes en malla con la propuesta del nuevo estándar IEEE 802.11s.

TABLA 2-2. COMBINACIONES VÁLIDAS DE TIPOS Y SUBTIPOS

Valor del Tipo b3 b2	Descripción del Tipo	Valor del Subtipo b7 b6 b5 b4	Descripción del Subtipo
01	Control	0000-0101	Reservado
01	Control	0110	RTX
01	Control	0111	CTX
11	Extendida	0000	Datos de la malla
11	Extendida	0001	Datos de la malla + CF-Ack
11	Extendida	0010-1111	Reservado

De la misma manera, existe otro subcampo denominado campo de datos adicionales que en el caso de las redes en malla debe fijarse por los MPs para enviar mensajes *unicast*, *broadcast* o *multicast* a otros MPs que se encuentran en un modo de conservación de energía cuando hay más MSDUs o más Unidades de Datos del Protocolo de Administración MAC (*MAC Management Protocol Data Unit, MMPDU*) para transmitirse al MP en el intervalo de señalización actual.

El nuevo campo de control de reenvío en la malla cuyo formato puede observarse en la Figura 2-13, es un campo de 24 bits que incluye un campo de TTL, utilizado en el reenvío multitrayecto para eliminar la posibilidad de ciclos infinitos, y un número de secuencia de malla extremo a extremo utilizado en el control de inundaciones *broadcast* y la entrega ordenada de mensajes en la red en malla WLAN. El campo de control de la malla se presenta en todas las tramas de tipo extendido con un subtipo datos de malla [+ CF-Ack] según la lista de combinaciones válidas de tipos y subtipos ilustrada en la Tabla 2-2.

23	22	...	9	8	7	...	0
Número de secuencia de malla extremo a extremo					Tiempo de Vida (TTL)		

Figura 2-13. Campo de control de reenvío en la malla

- **Tramas de gestión de la malla:** El intercambio de tramas de gestión 802.11 debe soportarse entre los MPs vecinos. Las tramas de gestión definidas en el estándar IEEE 802.11 contienen un encabezado que soporta dos campos de dirección denominados Dirección de Destino (*Destination Address, DA*) y Dirección de Fuente (*Source Address, SA*). En la nueva topología de malla estos campos contendrán los siguientes valores:
 - **Campo DA:** Dirección MAC del MP receptor (con respecto a la transmisión a un salto).
 - **Campo SA:** Dirección MAC del MP transmisor (con respecto a la transmisión a un salto).
 - **Campo de Identificador del BSS (*BSS Identifier, BSSID*):** Este campo no se utiliza por las tramas de gestión transmitidas entre los MPs (Se recomienda que todos los campos que no se definen por la propuesta se fijen en 0 para que se tenga una compatibilidad con los equipos antiguos).

El formato de la trama de gestión puede observarse en la Figura 2-14.

Bytes: 2	2	6	6	6	2	0-2312	4
Control de Trama	Duración	DA	SA	BSSID	Control de Secuencia	Cuerpo de la Trama	FCS
Encabezado MAC							

Figura 2-14. Formato de la trama de gestión

El campo de cuerpo de la trama que se ilustra en la Figura 2-14 puede variar de tipo de acuerdo a lo que se especifica en la tabla de combinaciones válidas de tipos y subtipos del estándar IEEE 802.11-1999 (Tabla 1-Combinaciones válidas de tipos y subtipos [33]), es así como este campo puede contener una trama de tipo *beacon*, solicitud de asociación, respuesta de asociación, solicitud de reasociación, respuesta de reasociación, solicitud de prueba o respuesta de prueba, entre otras. Si se opera en el modo de malla la información contenida en los tipos de trama mencionados anteriormente debe modificarse con el fin de asegurar un buen comportamiento de la red en malla WLAN. Las modificaciones y adiciones necesarias se detallan con mayor profundidad en el Anexo B.

Asimismo, en el Anexo B se precisan todas las modificaciones realizadas a los formatos de las tramas MAC junto con los nuevos elementos de información creados como componentes de longitud variable del cuerpo de la trama de gestión, útiles para el manejo adecuado de la red en malla WLAN. Además, se hace una descripción de los diferentes servicios que puede proporcionar una malla WLAN bajo el estándar propuesto IEEE 802.11s.

• Servicios de la malla WLAN

El nuevo estándar en desarrollo implementa algunos servicios que se resumen a continuación y se precisan con más detalle en el Anexo B.

- **Uso del identificador de malla:** Este identificador se utiliza como un símbolo que identifica una red en malla con propiedades conocidas y creada por una autoridad administrativa conocida. Conceptualmente, el Identificador (ID) de la malla tiene un propósito similar al de un SSID que se utiliza para permitir que las STAs identifiquen APs candidatos con los cuales puedan conectarse. Los usos del ID de la malla son múltiples pero están fuera del alcance del estándar.
- **Dispositivos de radios únicos y múltiples:** Un dispositivo que opera con el estándar 802.11a y 802.11b, pero no con los dos al mismo tiempo, puede considerarse como un dispositivo de un solo radio, incluso si este contiene los dos radios físicamente. En contraste, un dispositivo con múltiples radios no necesita operar cada radio en una banda diferente y es posible que tenga más de un radio 802.11x¹¹.

¹¹ A lo largo de todo el documento, el termino 802.11x hará referencia al estándar IEEE 802.11 o cualquiera de sus derivados (802.11a, 802.11b u 802.11g).

Un MP de múltiples radios utilizará diferentes direcciones MAC para cada radio y se tratará como varios MPs conectados por un conmutador. Dicho conmutador es parte de la malla WLAN y se trata como un bloque que no introduce retardo a la comunicación.

- **Descubrimiento de la topología y formación de malla:** Para la formación de la malla es necesario que los miembros de la red tengan la información suficiente acerca de sí mismos y de las conexiones disponibles entre ellos. Este proceso requiere la detección de los miembros por medio de *beacons* o de escaneo activo realizado a través de solicitudes de mensajes de prueba, seguido de un intercambio de información de enrutamiento que puede incluir la información del estado del enlace.

La formación de la malla es un proceso continuo que implica un monitoreo de los nodos vecinos y sus conexiones de manera que se detecte y reaccione a los cambios en el número de vecinos de la malla y en las conexiones entre ellos.

El descubrimiento de nuevos vecinos se realiza haciendo uso de un perfil contenido por cada uno de los dispositivos que incluye información del ID de la malla, el ID del protocolo de selección de ruta y el ID de la métrica, utilizados por el dispositivo.

Durante el proceso de formación y mantenimiento del enlace es necesario realizar un establecimiento y mantenimiento del enlace de par, así como un descubrimiento y mantenimiento del estado del enlace local. Opcionalmente, según la configuración de la red y del perfil seleccionado es posible descubrir la presencia de un portal en la red en malla.

- **Selección del trayecto de la malla y reenvío:** Este proceso involucra la selección de uno o múltiples trayectos y el reenvío de las tramas de datos entre los MPs en el nivel de enlace, utilizando el formato de mensajes de datos del estándar IEEE 802.11-1999, con extensiones 802.11e para la transferencia de etiquetas 802.1p¹², con el fin de hacer uso de las clases de prioridades establecidas por el estándar 802.1p.
- **Seguridad:** El acceso al enlace propuesto se basa en el mecanismo de seguridad denominado Asociación de Red con Seguridad Robusta (*Robust Security Network Association, RSNA*) 802.11i y soporta autenticación centralizada o distribuida, con base a cualquier estándar 802.1X, y administración de llaves.

En una red en malla, un MP realiza los roles de solicitante y autenticador y puede opcionalmente realizar el rol de Servidor de Autenticación (*Authentication Server, AS*). El AS puede instalarse con un MP, como en el caso de la Figura 2-15, o localizarse en una entidad remota con la cual el MP tiene una conexión segura, como se muestra en la Figura 2-16.



Figura 2-15. AS junto al MP

¹² 802.1p: Estándar IEEE que define diferentes prioridades para el tráfico de redes locales entre conmutadores *Ethernet*, basado en el puerto de conmutación, la dirección MAC o la dirección IP que se asocian al equipo final de comunicación. Los paquetes se marcan como pertenecientes a una cola, que determina la prioridad del paquete. Según la norma 802.1p, las colas 0 a 3 tienen prioridad normal, y las 4 a 7 prioridad alta. Este estándar funciona conjuntamente con el estándar 802.1Q para redes locales virtuales.

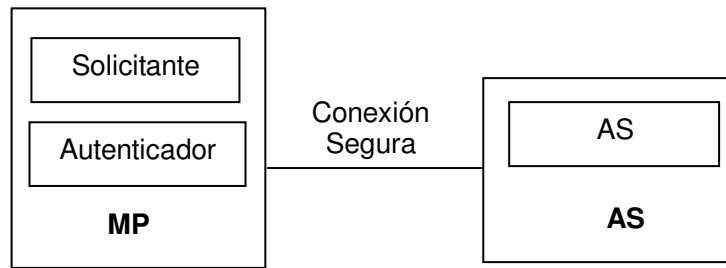


Figura 2-16. AS localizado en una entidad remota

Un MP puede establecer una RSNA utilizando un modelo de autenticación 802.1X centralizado, un modelo de autenticación 802.1X distribuido o un modelo de autenticación de llave precompartida. La descripción detallada de estos modelos se presenta en el Anexo B.

Seguridad en la trama de gestión de la malla

El objetivo de la seguridad en la trama de gestión de la malla es asegurar la autenticidad, integridad y privacidad (donde sea necesaria) de las tramas de gestión que se envían y reciben entre los MP enlace a enlace. El modelo de autenticación del nivel de enlace, que se basa en el estándar 802.11i, se utilizará para manejar la autenticación, distribución de llaves y encriptación de las tramas de gestión.

En la propuesta se plantea implementar mecanismos de seguridad a nivel de enlace teniendo en cuenta las recomendaciones del TGW en cuanto a protección contra falsificación y confidencialidad, compatibilidad con claves 802.11i/k, inclusión de nuevas tramas de gestión, protección después del establecimiento de las llaves, soporte de fragmentación para las tramas de gestión, entre otras cosas.

- **Soporte para la selección dinámica de frecuencia:** Si un MP detecta la necesidad de cambiar el canal de una interfaz lógica de radio, debido por ejemplo, a requerimientos regulatorios o evasión de radares, el MP informará este cambio a los vecinos con los cuales existe una asociación y procederá a solicitar a otros MPs o STAs que busquen y proporcionen medidas y/o corran otros algoritmos para hacer el cambio de canal. Una vez que el MP identifique el canal candidato al cual cambiar su interfaz lógica, este creará un nuevo indicador del valor de precedencia del canal, adicionando un número aleatorio al valor de precedencia del canal actual y seguirá un proceso definido por el protocolo de cambio del *cluster* del canal.
- **Sincronización y generación del beacon en la malla:** Estos dos procesos se basan en la Cláusula 11.1 del estándar IEEE 802.11-1999 para los modos de operación en infraestructura e IBSS.

Un MP puede escoger tener soporte para sincronización lo cual significa que actualizará su temporizador de acuerdo a las medidas de tiempo recibidas en los *beacons* y mensajes de respuestas de prueba de otros MPs sincronizados, o puede decidir ser un MP no sincronizado lo cual conlleva a tener su propia Función de Sincronización de Tiempo (*Timing Synchronization Function*, TSF) que no depende de otros MPs.

Los MPs sincronizados y no sincronizados generan *beacons* de acuerdo al procedimiento definido en la Cláusula 11.1.2.1 del estándar IEEE 802.11-1999.

Con lo anteriormente estudiado, se puede concluir, que las tecnologías IEEE 802.11x poseen grandes ventajas que pueden ser de gran ayuda en el momento de implementar una red inalámbrica en malla para el transporte de voz en un entorno rural, en primer lugar, esta familia de estándares se ha difundido ampliamente por todo el mundo y se constituye en la tecnología dominante para las soluciones inalámbricas empresariales, residenciales o de acceso público a Internet. Factores como el uso de frecuencias libres disponibles en varios países, la disponibilidad de equipos a precios bajos e interoperabilidad entre sus dispositivos, velocidades aceptables para la implementación de múltiples aplicaciones, flexibilidad, entre otros aspectos, representan un punto a favor para la adopción de estas

tecnologías en países en vía de desarrollo que a pesar de sus carencias buscan emplear nuevos sistemas a partir de los cuales puedan comunicar la mayoría de sus localidades.

Pese a que todavía existen varios problemas por resolver para asegurar un funcionamiento perfecto de estas tecnologías, los organismos internacionales de estándares, las alianzas de la industria constituidas por las empresas más importantes del mercado y varios centros de investigación llevan a cabo varios proyectos enfocados a mejorar el funcionamiento de estas redes y lograr una aceptación total en el mercado, lo cual permite deducir que el futuro de las redes 802.11x está asegurado.

Enfocándose en el tema de estudio de este proyecto de grado, puede notarse que existe un grupo de trabajo bastante fuerte que ha logrado grandes avances para la estandarización de las WMNs, además, como se verá en el siguiente capítulo, la mayoría de los despliegues comerciales y estudios de investigación particulares de redes en malla se realizan en su mayor parte empleando los estándares 802.11x como tecnología inalámbrica de comunicación debido a que en resumen, esta tecnología presenta las mayores ventajas en cuanto a costos, velocidad, requerimientos de ancho de banda, interoperabilidad y aceptación en el mercado.

Aunque esta tecnología se perfila como la adecuada para el diseño de este trabajo de grado, a continuación se presenta el tratamiento de la malla en el estándar 802.16 que es una tecnología emergente pensada para la distribución inalámbrica de la conectividad de datos con QoS a largas distancias.

2.3 ESTÁNDAR IEEE 802.16-2004

El estándar IEEE 802.16-2004 [37] define la especificación de la interfaz aérea para el acceso inalámbrico de banda ancha global, con capacidad, robustez y desempeño altos sobre tecnologías fijas, portátiles y móviles, en coberturas extensas. Trabaja en bandas licenciadas como no licenciadas y tiene la posibilidad de desenvolverse en escenarios que no reúnen condiciones de línea de vista.

Define un nivel MAC que soporta principalmente una arquitectura Punto a Multipunto (*Point to MultiPoint*, PMP) con una topología opcional de malla y se estructura para soportar varias especificaciones de nivel físico que dependen de la región del espectro en uso y las regulaciones asociadas.

A diferencia de los estándares que gobiernan las WLAN tales como el IEEE 802.11 y sus derivados (802.11a, 802.11b y 802.11g), el 802.16 no exhibe tasas de rendimiento fijas para usuarios individuales sino que presenta en promedio un máximo de 70 Mbps para un ancho de banda de canal de 20 MHz.

El estándar 802.16 original creado por el grupo de trabajo 802.16 del IEEE en el año 2001 se orientó a operación fija en la banda que va desde los 10 GHz a los 66 GHz; luego se generó la versión 802.16c en el año de 2002, con mejoras de interoperabilidad facilitando la coexistencia entre sistemas; posteriormente se incluyó la operación entre los 2 GHz y 11 GHz, cuyos resultados consolidaron la versión 802.16a en el año 2003; en octubre de 2004, se aprobó el estándar IEEE 802.16-2004 (denominado inicialmente 802.16d como reemplazo del 802.16a) que aplica para el espectro de los 2 GHz a los 66 GHz, complementa las ratificaciones anteriores y entre sus modificaciones principales se encuentra la asociada con el consumo de potencia de los sistemas, especialmente respecto a su antecesora (la versión a); finalmente en diciembre de 2005 se aprobó la última versión del estándar denominada 802.16e, que incorpora el concepto de movilidad (parcial y total) para el soporte de usuarios nómadas y con velocidad vehicular.

El nuevo estándar introduce el soporte de la tecnología de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal Escalable (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*, SOFDMA), que es una variación de la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*, OFDMA) implementada en el estándar 802.16-2004. La técnica de acceso SOFDMA permite un número variable de portadoras, que se añade a los modos OFDM y OFDMA ya existentes. Además, IEEE 802.16e ofrece un soporte mejorado de las tecnologías MIMO y Sistemas de Antenas Adaptativas (*Adaptive Antenna Systems*, AAS). También, incluye mejoras para la optimización del consumo de energía para los dispositivos móviles y con ello permite disminuir el tamaño de los equipos, así como extensas características de seguridad.

Dado que este proyecto se enfoca hacia el estudio de las redes en malla en ambientes fijos, a continuación se presenta el tratamiento que el estándar IEEE 802.16-2004 realiza a la configuración de la malla.

En la Tabla 2-3 [38] se enumeran las especificaciones físicas que el estándar IEEE 802.16-2004 implementa para cada una de las frecuencias.

TABLA 2-3. ESPECIFICACIONES PHY PARA EL ESTÁNDAR IEEE 802.16-2004

Estándar	Banda de Frecuencia	PHY	MAC	Duplexación
WirlessMAN-SC	10-66 GHz	SC	Básico	Duplexación por División de Tiempo (<i>Time Division Duplex</i> , TDD), Duplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Duplex</i> , FDD)
WirlessMAN-SC2	2-11 GHz	SC2	Básico+ARQ+STC+AS	TDD, FDD
WirlessMAN-OFDM	2-11 GHz Licenciada	OFDM	Básico+ARQ+STC+D FS+AAS	TDD, FDD
WirlessMAN-OFDM	2-11 GHz No Licenciada	OFDM	Básico+ARQ+STC+D FS+"Mesh"+AAS	TDD
WirlessMAN-OFDMA	2-11 GHz Licenciada	OFDMA	Básico+ARQ+STC+D FS+AAS	TDD, FDD
WirlessMAN-OFDMA	2-11 GHz No Licenciada	OFDMA	Básico+ARQ+STC+D FS+AAS	TDD

Como puede observarse en la Tabla 2-3, la especificación física WirelessMAN-OFDM es la única que tiene un tratamiento específico para la malla, en el cual se definen las diferentes tramas, campos y procesos necesarios para el establecimiento y operación de esta topología, así como las condiciones de las tramas y subtramas necesarias para la comunicación. Al contrario del sistema punto a multipunto, no se define una trama de *uplink* y otra de *downlink* sino un conjunto de tramas donde los usuarios pueden transmitir, previa asignación de rangos de tiempo. Las tramas se dividen en subtramas de control y datos. Las primeras permiten controlar la operación de la malla y realizar procesos de solicitud y asignación de capacidad, mientras que las segundas se dividen en unidades de tamaño fijo, llamadas *minislots*, las cuales son la unidad de asignación de la capacidad a los usuarios. Un usuario puede recibir entre 1 y 256 unidades anteriores, especificando el *minislot* de origen y la cantidad de *minislots* asignados.

Una descripción más detallada del tratamiento de la malla a nivel físico realizada por la especificación WirelessMAN-OFDM se encuentra en el Anexo C.

2.3.1 Establecimiento de una Red Inalámbrica en Malla

El proceso de establecimiento de una red en malla puede dividirse en tres fases: entrada a la red, establecimiento de los enlaces y negociación de la capacidad [39].

La fase de entrada a la red inicia cuando un nodo aparece en la red, bien sea porque se acerca a su área de cobertura o porque se enciende, entonces este nodo debe buscar sincronizarse con la red. Esto se logra explorando los campos de las tramas recibidas hasta encontrar un mensaje de configuración llamado *MSH-NCFG*. Una vez determinadas las condiciones de la red, debe elegir un nodo de apoyo o *Sponsor*, el cual determinará su ingreso o no a la red. Este proceso se muestra en la Figura 2-17 [39],

e incluye la sincronización fina debido a retardos de propagación, asignación de una dirección IP, configuración adicional del nodo y autorización del ingreso del nodo.

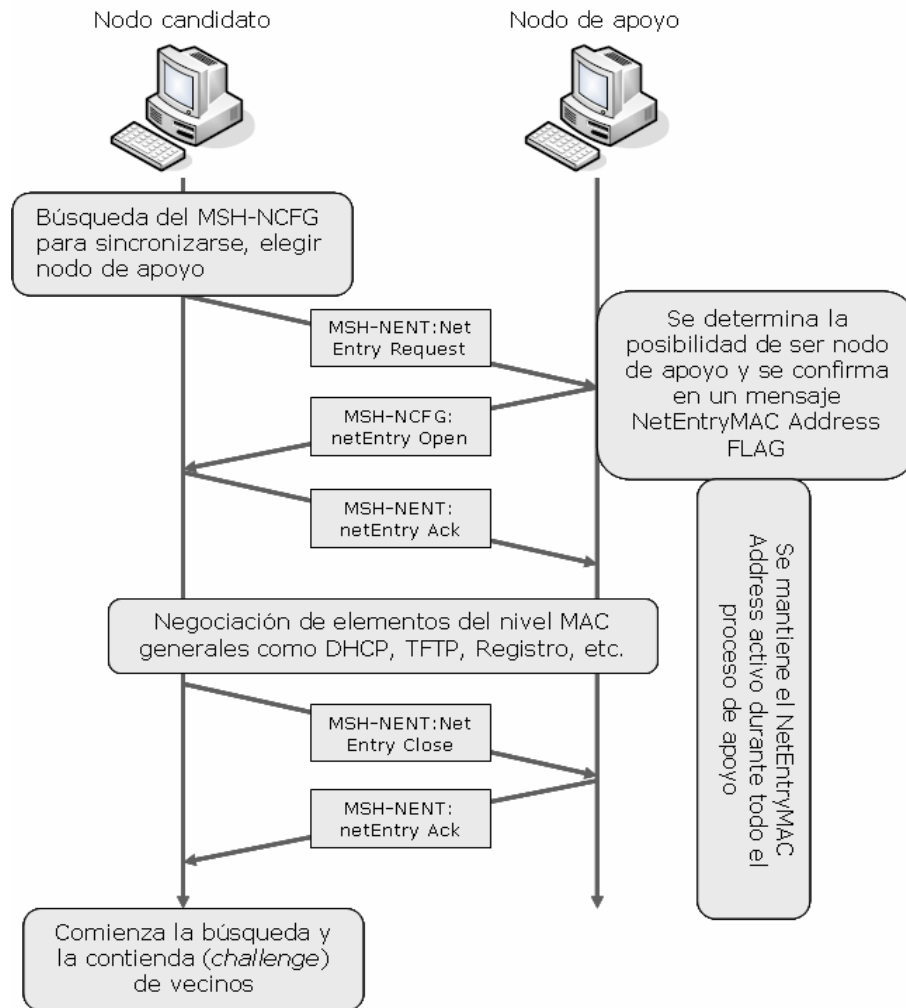


Figura 2-17. Entrada de un nodo a la red

Cuando un nodo logra su entrada a la red, debe iniciar la segunda fase que corresponde al establecimiento de los enlaces con sus vecinos. El nodo escucha permanentemente los mensajes transmitidos en la red hasta determinar los vecinos que se encuentran a su alrededor. Posteriormente, el nodo envía mensajes a estos nodos para establecer enlaces con ellos. En este caso, entre dos nodos se establece una etiqueta del enlace o *Link ID*, correspondiente a los 8 bits inferiores del CID. Los nodos negocian la velocidad de comunicación y condiciones de modulación y codificación a utilizar en este enlace. Todo el proceso de negociación se realiza por medio de encabezados de configuración, transmitidos a velocidad y codificación común y robusta. El proceso de establecimiento del enlace se muestra en la Figura 2-18 [39].

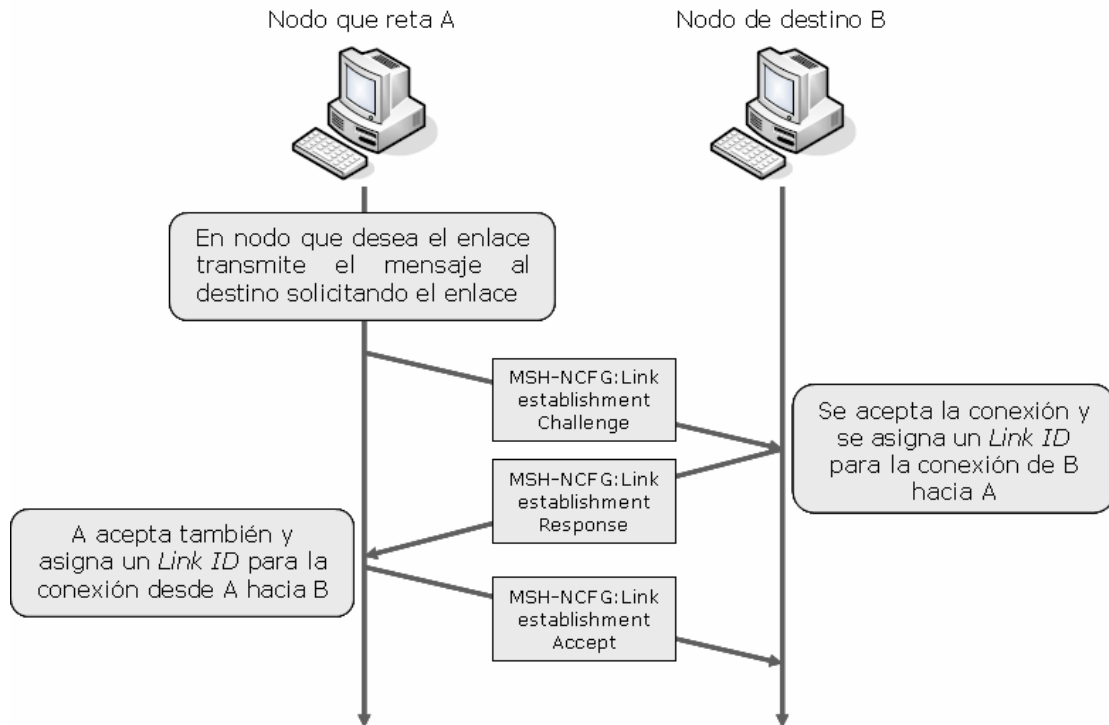


Figura 2-18. Establecimiento de enlaces entre nodos

Finalmente, se realiza un proceso de planificación por medio de uno de los siguientes métodos: centralizado o distribuido, con y sin coordinación. En todos ellos el estándar define los procesos, campos y señalización para que un nodo pueda solicitar capacidad (*request*) y para que se pueda asignar esta capacidad (*grant*).

El método centralizado se utiliza cuando la variabilidad del tráfico de los nodos es lo suficientemente lenta como para que se justifique todo el proceso de recolección de las peticiones hasta un nodo centralizado y el tiempo necesario para la distribución del nuevo esquema de asignación. En este caso, existe un nodo que conoce el estado de toda la red.

El método distribuido se orienta a sistemas en los cuales las asignaciones de capacidad se cambian permanentemente, sin la posibilidad de esperar mientras se centraliza la información. El costo son algoritmos computacionales muy complejos, usualmente de órdenes de complejidad no polinómicos [40] [41] [42] [43] lo cual significa que a medida que el tamaño del problema se incrementa, mayor será la complejidad y la cantidad de recursos requeridos en el equipo para resolver el algoritmo.

Los algoritmos de planificación son un tema de investigación abierto pues se necesita el desarrollo de modelos simples que puedan aplicarse en tiempo real en máquinas de baja capacidad computacional, con requerimientos de cálculo bajos.

En el Anexo D se realiza una descripción detallada del tratamiento del nivel MAC para la topología de malla.

Concluyendo la explicación del estándar 802.16-2004 se puede notar, que esta tecnología mejora significativamente los requerimientos de distribución con calidad de servicio en exteriores, gran ancho de banda y alcance de varios kilómetros entre los nodos, con respecto a lo ofrecido por otras tecnologías inalámbricas, sin embargo, es necesario precisar que por ser un estándar relativamente nuevo su presencia en el mercado todavía es escasa y más aún en Colombia, lo cual conlleva a un costo supremamente alto de los equipos comparado con otras tecnologías más comunes y puede ser una desventaja para soluciones como las propuestas en este proyecto de grado, que se enfoca en la interconexión de entornos rurales que generalmente se ven limitados por factores económicos.

Como resumen de este capítulo y para establecer el marco comparativo entre las tecnologías IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16; en la Tabla 2-4 se presenta una lista que reúne las características más importantes de las tecnologías estudiadas y permite observar el enfoque de cada una de ellas.

TABLA 2-4. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS IEEE 802.15.4, 802.11 Y 802.16

Característica	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11	IEEE 802.16
Área de cobertura	Personal 1 – 10 metros	Local 100 m – 20 Km	Metropolitana 20 – 50 Km
Frecuencia	868 y 915 MHz 2.4 GHz	2.4 GHz 802.11b/g 5 GHz 802.11a	Lic. 2.5 y 3.5 GHz No lic. 5.8 GHz
Velocidad	250 Kbps a 2.4 GHz 40 Kbps a 915 MHz 20 Kbps a 868 MHz	11 Mbps 802.11b 54 Mbps 802.11a/g	70 Mbps
Aplicaciones	Domótica, sistemas de control industrial, sensores	Acceso inalámbrico de voz y datos, <i>hotspots</i> , aplicaciones empresariales	Acceso inalámbrico de voz y datos, <i>backhaul</i> inalámbrico
Estandarización de la malla	802.15.5 en proceso	802.11s en proceso	802.16-2004

Finalmente se concluye, que el análisis de las capacidades y alcances de los estándares IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16 para el transporte de voz en su modo de operación en malla, centrado en su funcionamiento a nivel físico y MAC, permitió identificar las ventajas y desventajas generales que cada uno de los estándares presenta para la implementación de una red en malla y el campo de aplicación hacia el cual se dirigen, sin embargo, para realizar una correcta escogencia de la tecnología adecuada para un escenario en particular es necesario determinar los requerimientos del entorno en el cual se implementará la solución, para tal fin, en el siguiente capítulo se presentan los criterios de negocio, tecnológicos y de diseño que deben tenerse en cuenta para la implementación de una red en malla para el transporte de VoIP en un entorno rural.

3. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS FIJAS EN CONFIGURACIÓN DE MALLA PARA ENTORNOS RURALES

Después de realizar un estudio profundo de cada una de las tecnologías inalámbricas que tiene soporte para la operación en malla, es necesario definir algunos criterios de diseño que permitan determinar cuál es la solución más adecuada para el transporte de voz en una topología de malla fija en un entorno rural, no sin antes observar que dicho escenario y los requerimientos específicos para el tratamiento de la voz, introducen ciertos factores que influyen en la decisión de la solución apropiada.

Para conseguir el objetivo de este capítulo, como primera medida se definirán las variables de contorno que caracterizan a un entorno rural y a partir de estas consideraciones, se clasificarán los criterios de acuerdo a una de las siguientes categorías: criterios de negocio que se enfocan en el estudio del estado actual de cada una de las tecnologías y el mercado hacia el cual se dirigen, criterios tecnológicos que hacen referencia a aquellos aspectos técnicos que diferencian cada una de las tecnologías y por esta razón se presentan de acuerdo al nivel OSI al cual corresponden y criterios de diseño que resumen algunas recomendaciones a tener en cuenta en el momento de realizar los procesos de la ingeniería del radioenlace.

3.1 DEFINICIÓN DEL ESCENARIO DE OPERACIÓN

Uno de los objetivos principales de este proyecto es definir cuál es la tecnología adecuada para el transporte de voz en un entorno rural con una topología de malla inalámbrica fija, teniendo en cuenta que la solución final se ve fuertemente limitada por las condiciones económicas, técnicas, políticas o demográficas que un escenario rural conlleva. En consecuencia, antes de construir la red es recomendable revisar las siguientes restricciones que generalmente se presentan en un escenario rural:

- **Ausencia de infraestructuras de comunicación:** La falta o deficiencia de la infraestructura vial y de comunicaciones sumado a las grandes distancias que se debe recorrer dificultan el despliegue rápido de la red y el acceso a los diferentes puntos del sistema de telecomunicaciones.
- **Gran dispersión de la población y dificultad de acceso:** La mayoría de los establecimientos rurales se encuentran en lugares difícilmente accesibles. Este factor, sumado a la gran dispersión de la población, sugiere el uso de tecnologías inalámbricas de largo alcance.
- **Inexistencia o mala calidad de la infraestructura de electrificación:** La mayoría de los establecimientos no cuentan con sistemas de suministro de energía eléctrica. Esto obliga a utilizar tecnologías de bajo consumo y dotar a los sistemas de telecomunicaciones de alimentación eléctrica autónoma para garantizar un funcionamiento continuo.
- **Necesidad de proponer soluciones de bajo costo y de bajo mantenimiento para asegurar su sostenibilidad a mediano y largo plazo:** Los ingresos de los establecimientos rurales generalmente son tan bajos que descartan cualquier solución tecnológica con altos costos de operación. Se excluyen de esta forma redes de operador tales como la telefonía móvil, las infraestructuras cableadas, redes satelitales y redes que requieren de bandas de frecuencias con licencias costosas.
- **Dificultad en el mantenimiento y ausencia de personal técnico calificado:** Existe una dificultad real para la realización de las tareas de mantenimiento y reparación de sistemas sofisticados de comunicación en la zona rural. Esto se debe a la dificultad en el acceso, la falta de recursos humanos calificados y a la concentración de los servicios técnicos en las grandes ciudades. Se requieren por tanto soluciones tecnológicas robustas, auto configurables, sencillas de usar y de fácil mantenimiento.

3.2 CRITERIOS DE NEGOCIO

3.2.1 Visión General del Mercado

Un aspecto importante que se debe considerar en el momento de seleccionar una tecnología es el tipo de mercado hacia el cual se dirige la solución inalámbrica teniendo en cuenta los servicios que se proporcionarán y los tipos de usuarios que accederán a dichos servicios.

En este sentido, puede observarse que el mercado al que se dirige cada una de las tecnologías estudiadas en el capítulo 2 es quizá el punto de comparación más evidente. A pesar de compartir algunas características fundamentales, los estándares base IEEE 802.15.4, 802.11 y 802.16 en los cuales se realiza un tratamiento especial para las redes en malla, se acercan al espacio inalámbrico desde perspectivas completamente diferentes, complementándose en lugar de competir entre sí, pues aunque es posible que existan campos en los cuales cada una de las tecnologías pueda actuar, cada estándar se diseñó para un propósito en particular enmarcado por un tamaño específico de área de cobertura, velocidades máximas alcanzadas, anchos de banda ofrecidos y aplicaciones particulares para las cuales funciona eficientemente.

Es así como el estándar IEEE 802.15.4 es un sistema de comunicaciones inalámbrico, que se aplica a redes de área personal, útil para aplicaciones con una potencia limitada, bajas velocidades de transmisión y requisitos de desempeño no muy exigentes. Esta especificación puede aplicarse en dispositivos de domótica, automatización de edificios (inmótica), control industrial, periféricos de computadores y sensores médicos.

Por su parte, el estándar IEEE 802.11 es una tecnología de red diseñada para proporcionar conectividad inalámbrica y agregar movilidad a los dispositivos que se encuentren distribuidos a través de una red de área local. Este estándar y sus derivados (tales como 802.11a, 802.11b, 802.11g) se han desarrollado ampliamente en escenarios de LAN comerciales, gubernamentales y residenciales y en algunas aplicaciones en redes de servicio público, principalmente *HotSpots*, proporcionando cobertura del rango de cientos de metros.

Finalmente, el estándar IEEE 802.16 se diseñó desde cero para proveer acceso inalámbrico de banda ancha, con capacidad, robustez y desempeño altos, sobre redes de área metropolitana. Su principal propósito es proveer servicios de acceso de Internet inalámbrico para competir con los proveedores de cable de banda ancha o DSL, o proveer un acceso básico de voz y banda ancha en áreas subabastecidas donde no existe ninguna otra tecnología de acceso. Esta tecnología también es una solución viable para el *backhaul* inalámbrico de puntos de acceso Wi-Fi o redes celulares, en particular si se usa el espectro que requiere licencia. Asimismo, en ciertas configuraciones, WiMAX fijo puede utilizarse para proveer mayores velocidades de datos y, por lo tanto, puede utilizarse como una opción de reemplazo de T1/E1 (1.544 Mbps/2.048 Mbps) para abonados corporativos de alto valor.

3.2.2 Implementaciones Actuales de las WMNs

Después de identificar el mercado hacia el cual se dirige la solución, es necesario realizar un estudio acerca del estado del arte de las redes en malla en cada una de las tecnologías. Esto permitirá visualizar cuál tecnología presenta un mayor desarrollo y aceptación en el mercado y de esta manera, será posible escoger una tecnología que tenga proyección en el futuro, cuente con el apoyo de la industria, permita encontrar soluciones afines y facilite la compra de los equipos.

Actualmente, existe una gran cantidad de aplicaciones en el campo de las redes en malla y redes *ad hoc*, cada una con diferentes objetivos y criterios de diseño, y muchas otras se desarrollan mientras se escribe este documento. Está más allá del alcance de este proyecto mostrar una lista completa de los sistemas disponibles, por lo cual se describirán brevemente los sistemas y productos más significativos de las redes en malla.

Los principales promotores del estándar IEEE 802.15.4 ven a las redes en malla como la solución adecuada para la interconexión de sus sistemas de control industrial y del hogar. Es así como será posible controlar a través de un solo dispositivo aplicaciones tan diversas como sistemas de riego, televisión, seguridad, apertura puertas automáticas, etc.

En el mercado existen algunas empresas que ya ofrecen soluciones que involucran el uso de redes en malla. Entre ellas se encuentra la empresa Ember [44] que comercializa productos *hardware*, *software* y herramientas de desarrollo para interconexiones inalámbricas embebidas que requieren anchos de banda moderados. Estos productos son útiles en aplicaciones industriales tales como plantas de tratamiento de agua, fábricas y estaciones de suministro de energía. Los productos de Ember emplean un algoritmo de enrutamiento patentado que establece una arquitectura de interconexión en malla con un esquema distribuido que no requiere de un servidor central. Operan en la banda Industrial, Científica y Médica (*Industrial, Scientific and Medical, ISM*) de 915 MHz y utilizan radios con tecnología DSSS de 20 canales. Además soportan el Estándar de Encriptación Avanzada (*Advanced Encryption Standard, EAS*). Cada dispositivo emplea una pila de protocolos de Ember que incluye una Interfaz de Programación de Aplicaciones (*Application Programming Interface, API*) y el algoritmo de enrutamiento mencionado.

Otra solución presente en el mercado la presenta la empresa Crossbow [45] con su pila de protocolos propietaria que constituye una arquitectura abierta, flexible y una plataforma de control de redes inalámbricas embebidas muy potente construida sobre el sistema operativo *TinyOs*. Esta arquitectura combina el alto rendimiento comprobado con la interoperabilidad a través del soporte de estándares abiertos incluyendo el estándar IEEE 802.15.4/ZigBee.

De la misma manera, existen otras empresas como Helicomm [46], MeshNetics [47], Ubiwave [48], Airbee ZNMS [49], Freescale [50], entre otras, que se encuentran incursionando en el tema de las redes inalámbricas en malla pero es necesario precisar que todas estas empresas se enfocan hacia aplicaciones industriales y de sensores.

Como se mencionó en la sección 2.1.3 del capítulo 2, desde el año 2003 el IEEE creó el grupo de trabajo denominado TG5 con el propósito de determinar los mecanismos necesarios que deben estar presentes en los niveles físico y MAC de las WPANs para habilitar y estandarizar la topología de malla. Sin embargo, el proceso de generación del nuevo estándar es lento y pausado, desde mayo de 2004 se lanzó la primera Llamada para Aplicaciones (*Call For Applications, CFA*) y algunas empresas respondieron a este llamado, pero esta fase se viene aplazando continuamente; después de varios meses de inactividad en marzo de 2006 se publicó un primer borrador pero en el momento se está a la espera de más contribuciones para mejorarlo, lo cual permite concluir que la estandarización de la malla para las WPAN puede tardar varios años y por el momento sólo se cuenta con soluciones propietarias que aunque funcionan muy bien por si solas no presentan la capacidad de interoperar con otros proveedores.

La tecnología 802.11 es la mejor posicionada en el ambiente de las redes en malla. Actualmente existen varias aplicaciones académicas de prueba en universidades como *Carnegie Mellon* [51], el Instituto Tecnológico de Massachussets (*Massachusetts Institute of Technology, MIT*) [52] [53], la Universidad de Illinois [54], el Instituto de Telecomunicaciones y Tecnologías de Información de California [55] y el Instituto de Tecnología de Georgia [56]. De igual manera, varios líderes industriales han creado productos o están trabajando en el desarrollo de nuevas WMNs; entre las compañías más sobresalientes se encuentran Cisco [57], MeshNetworks [58], Intel [59], Nortel [60], Tropos [61], Strix [62], BelAir [63] y Microsoft [64]. Con equipos de las marcas anteriores, se han desarrollado o planeado despliegues de redes inalámbricas en malla para ciudades como Lebanon, Oregon (utiliza equipos de Cisco), Atenas, Georgia (utiliza equipos de BelAir), Tempe, Arizona (utiliza equipos de Strix), Chaska, Minesota (utiliza equipos de Tropos), Saint Cloud, Florida y Filadelfia (utiliza equipos de Tropos), Ciudad de Culver, California (utiliza equipos de Firetide), Medford, Oregon (utiliza equipos de MeshNetworks), Cupertino (utiliza equipos de SkyPilot gear), Taipei (utiliza equipos de Nortel), Las Vegas (utiliza equipos de MeshNetworks y Tropos) y San Francisco. Todas estas aplicaciones permiten el envío de voz y datos sobre las WMNs.

También existen otros proyectos para desarrollar plataformas *hardware* útiles para las redes en malla tales como MeshCube [65], MeshNode [66], LocustWorld [67] que básicamente se componen de *boards* y tarjetas inalámbricas o APs a los cuales se les modifica su *firmware*¹³ para implementar las propiedades de enrutamiento de las WMNs. Algunos *firmware* creados para este fin son MeshLinux,

¹³ Firmware: Bloque de instrucciones de programa para propósitos específicos, grabado en una memoria tipo ROM, que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo.

Zebra/Quagga [68], CuWin [69], Pebble [70], OpenWRT [71] y FreifunkFirmware [72]; la mayoría se implementan sobre distribuciones Linux y bajo Licencia Pública General (*General Public License*, GPL).

Otro punto a favor de esta tecnología se encuentra en el trabajo constante que se viene realizando alrededor de la estandarización de la topología de malla, por medio de la creación del nuevo estándar IEEE 802.11s. El TGs comenzó sus actividades en el año 2003, pasó por la fase de CFA y en el momento se encuentra desarrollando el documento base del estándar. Aunque la finalización del estándar puede darse para inicios del año 2007, el TGs es el grupo de trabajo más fuerte en esta tecnología y se conforma por grandes empresas que demuestran su interés por agilizar el proceso de estandarización.

A pesar de que el estándar IEEE 802.16-2004 implementa un tratamiento especial para las redes en malla, hasta el momento no existe en el mercado algún tipo de dispositivo inalámbrico que permita crear redes con este tipo de configuración. Como se mencionará en la sección 3.3.1.5 de este capítulo, la empresa BelAir Networks desarrolló un nodo inalámbrico de 6 radios que tiene soporte para pre-WiMAX y WiMAX pero sólo en el tráfico de *backhaul* y el acceso se realiza por medio de radios 802.11a/b/g. Otras empresas como Nortel, SkyPilot, y Strix trabajan actualmente para incorporar la tecnología de WiMAX a sus arquitecturas de malla. En el ámbito investigativo, algunas universidades desarrollaron estudios y simulaciones para evaluar el desempeño alcanzado por estas redes utilizando esquemas de alerta de interferencias (*interference-aware scheme*) [73] o algoritmos para transmisiones concurrentes [74] y en Colombia, el Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI) de la Universidad Pontificia Bolivariana se enfoca hacia el análisis, modelamiento y simulación de redes en malla basadas en el nivel físico de este estándar [39].

3.3 CRITERIOS TECNOLÓGICOS

3.3.1 Nivel Físico

3.3.1.1 Escogencia del espectro licenciado o no licenciado

Como primera medida, es necesario decidir si se trabajará en un espectro licenciado o no licenciado. Esta decisión se ve influenciada por el escenario sobre el cual se implementará la red, las normas regulatorias de cada país y el presupuesto económico del proyecto.

El espectro licenciado es adecuado en escenarios de tipo urbano donde existen varios operadores inalámbricos y por lo tanto es necesario tener una protección contra interferencia, la cual se asegura al restringir a cada usuario en una banda en particular. Las desventajas de este tipo de espectro son el incremento considerable del costo de la solución inalámbrica, la inescalabilidad y las dificultades en el proceso de licenciamiento, el cual varía dependiendo de las regulaciones locales.

El espectro no licenciado por su parte, es recomendable en entornos rurales en donde prácticamente no existen tecnologías interferentes. Sin embargo, el concepto de espectro abierto, donde el recurso se comparte, introduce la necesidad de implementar mecanismos de protección contra interferencias tales como técnicas de codificación, control de potencia, subcanalización y técnicas de control de acceso al medio; el principal beneficio de un espectro no licenciado es que se trata de un recurso gratuito.

Si se opta por un espectro no licenciado también es necesario tener en cuenta las restricciones del nivel de potencia que los organismos de legislación imponen por el uso de estas bandas. Ese nivel de potencia máximo, que dependerá del país, del tipo de enlace, y a veces incluso del tipo de zona, es el que impone límites a la distancia.

En Colombia, el Ministerio de Comunicaciones es el organismo que se encarga de expedir la reglamentación para la operación de los sistemas de acceso inalámbrico y WLAN y atribuir las bandas de frecuencias radioeléctricas de libre utilización para sistemas inalámbricos que empleen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia, para operación sobre una base de no-interferencia y no protección contra interferencia [75]. Como puede observarse en la Figura 3-1, para las bandas no licenciadas de 902 MHz, 2.4 y 5.7 GHz, existe una restricción de potencia máxima transmitida de 1 W (30dBm) con una antena de 6 dBi de Potencia Isotrópica Radiada Efectivamente (PIRE).

Espectro en GHz	902 - 928	2.400 – 2483.5	5.150 – 5.250	5.250 – 5.350	5.470 – 5.725	5.725 – 5.850
Ancho de Banda	26 MHz	83.5 MHz	100 MHz	100 MHz	255 MHz	125 MHz
FHSS	Interior y Exterior 0,25-1 W	Interior y Exterior 0,125-1 W				Interior y Exterior 1 W
Modulación Digital	Interior y Exterior 1 W	Interior y Exterior 1 W	Interior UNII* 0,05 W	Interior y Exterior-UNII 0,25 W	Interior y Exterior-UNII 0,25 W	Interior y Exterior-UNII 1 W

* Infraestructura de Información Nacional Sin Licencia (Unlicensed National Information Infrastructure, UNII).

Figura 3-1. Bandas de frecuencia asignadas a Colombia

Revisando cada una de las tecnologías inalámbricas regidas por los estándares IEEE 802.15.4, 802.11x y 802.16-2004 se observa que éstas permiten trabajar tanto en espectro licenciado como no licenciado. A continuación se presenta una descripción detallada de las bandas de frecuencia disponibles para cada tecnología y las frecuencias más utilizadas para el entorno de malla.

El estándar IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de nivel físico: el nivel físico a 2.4 GHz, especifica la operación en la banda ISM, que prácticamente está disponible en todo el mundo y no requiere de licencia para su funcionamiento, mientras que el nivel físico a 868 y 915 MHz, especifica la operación en la banda ISM de 868 MHz para Europa y de 915 MHz para Estados Unidos. Soluciones de redes en malla propietarias tales como las desarrolladas por Helicomm o Ember, tienen soporte para el trabajo de sus dispositivos tanto en la banda de 915 MHz como en la banda de 2.4 GHz.

El estándar IEEE 802.11 describe cuatro interfaces de radio enlace que operan en las bandas no licenciadas de 2.4 GHz y 5 GHz, como se indica en la Tabla 3-1.

TABLA 3-1. INTERFACES DEL ENLACE RADIO WLAN DE IEEE 802.11

Estándar	Banda de frecuencia	Tasa máxima de bit	Velocidad dinámica	Canales sin traslape	Tecnología radio
802.11	2.4 GHz No Licenciada	2 Mbps	1 Mbps	3	FHSS/DSSS
802.11b	2.4 GHz No Licenciada	11 Mbps	5.5 Mbps 2 Mbps 1 Mbps	3	DSSS
802.11a	5 GHz No Licenciada	54 Mbps	48 Mbps 36 Mbps 24 Mbps 18 Mbps 12 Mbps 9 Mbps 6 Mbps	12	OFDM
802.11g	2.4 GHz No Licenciada	54 Mbps	Igual que 802.11a	3	OFDM

La mayoría de despliegues comerciales e implementaciones de prueba para investigación de redes inalámbricas en malla utilizan radios de tecnologías 802.11b/g para el acceso de los usuarios y radios de tecnología 802.11a para el tráfico *backhaul* de la red.

En lo que respecta al estándar IEEE 802.16-2004, el tratamiento para la malla se realiza dentro de la especificación WirelessMAN-OFDM la cual se diseñó para la operación NLOS entre los 2 GHz y los 11 GHz. Esta puede emplear bandas licenciadas en las frecuencias de 2.5 GHz y 3.4 a 3.65 GHz, o de lo contrario, bandas no licenciadas en las frecuencias de 3.65 a 3.7 GHz y 5 GHz.

3.3.1.2 Identificación del número de canales sin traslape

Una vez decidido el espectro a utilizar es necesario considerar el número de canales sin traslape que cada una de las tecnologías permite emplear. Este aspecto es muy importante al determinar la capacidad total del sistema, pues cuando un AP se introduce dentro de un sistema inalámbrico y se configura para trabajar en los canales sin traslape, los usuarios pueden experimentar que la capacidad se duplica. Si por el contrario, varios APs se instalan dentro de un rango determinado, y estos no se configuran en canales sin traslape, entonces, no sólo se perderán los beneficios agregados, sino que el funcionamiento del sistema en conjunto se reducirá. Esto se debe a que en la red, los paquetes provenientes de máquinas con traslape de canales colisionarán uno con el otro, lo cual causará la necesidad de utilizar retrasmisiones que disminuyen el rendimiento del sistema.

En seguida se describen la cantidad de canales sin traslape soportados por cada una de las tecnologías inalámbricas.

Como puede observarse en la Figura 3-2 [76], el estándar IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La capa física a 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902 y 928 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar con el mismo *hardware* para ambos y así reducir costos de manufacturación. La capa física a 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un ancho de canal de 2 MHz y espacio entre canales de 5 MHz, lo cual facilita los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

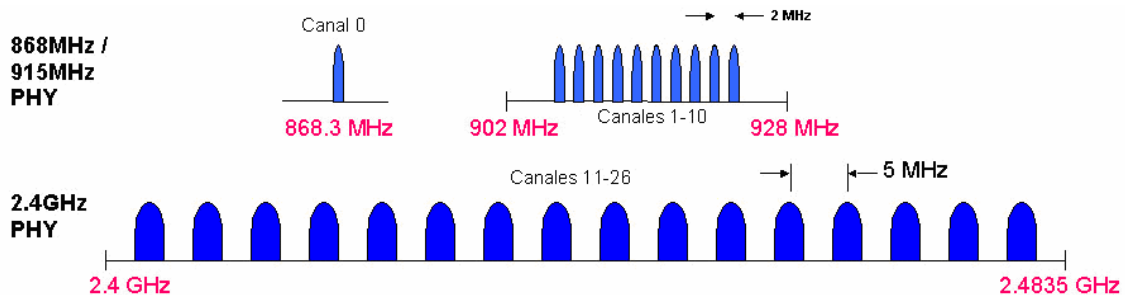


Figura 3-2. Canales de frecuencia del estándar IEEE 802.15.4

En lo que respecta a la familia de estándares IEEE 802.11, en la banda de 2.4 GHz los canales disponibles varían entre países; los canales comunes a todo el mundo son 11, cada canal tiene un ancho de 22 MHz y un espacio entre canal de 5 MHz, en la banda 2.4 a 2.4835 GHz. Cuando se necesita que estos canales sean mutuamente no interferentes se recomienda utilizar canales separados 25 MHz debido a que se trabaja dentro de un mismo dominio de colisión, lo cual deja un total de 3 canales disponibles en esas condiciones (canales 1, 6 y 11); esto impone una restricción en la capacidad del sistema sobre los desarrollos de 802.11b/g pues de esta manera, la distancia entre los APs que trabajan en el mismo canal es relativamente pequeña, lo que significa que el mismo canal debe reutilizarse frecuentemente para dar completo cubrimiento a un área específica, incrementando la probabilidad de interferencia co-canal.

El estándar 802.11a inicialmente ofreció una disponibilidad aventajada de 12 canales sin traslape (dependiendo del dominio regulatorio) junto con una velocidad de datos de 54 Mbps y un espectro despejado. Recientemente los cambios en la regulación han abierto más el espectro de la banda de frecuencia de 5 GHz, creando la posibilidad de tener 23 o más canales sin traslape. No todos los productos de 802.11 aprovechan todos los canales que tienen disponibles, sin embargo, los productos que están operando sobre un subconjunto de los canales disponibles, por ejemplo, utilizando 8 canales, tienen una ventaja significativa sobre la capacidad de los productos 802.11b/g.

En los dispositivos que se rigen con el estándar IEEE 802.16-2004 los anchos de banda del canal varían desde 1,25 MHz hasta 20 MHz, sin embargo, para la especificación WirelessMAN-OFDM, cuando se utiliza una banda no licenciada es necesario utilizar la técnica de duplexación por división de tiempo (TDD) cuyo valor típico de ancho de banda por canal es de 10 MHz, por lo tanto, si no se tienen en cuenta bandas de guarda para la separación de los canales, en el rango de frecuencias de 5.725 a

5.850 GHz se podrían asignar aproximadamente 12 canales sin traslape, lo que proporcionaría la cantidad adecuada de canales sobre todo por la baja densidad en zona rural.

3.3.1.3 Selección de la velocidad

La velocidad determina el tipo de aplicaciones que pueden implementarse en una red, por esta razón es preciso identificar que velocidad soporta cada una de las tecnologías.

El estándar IEEE 802.15.4 se creó para la transmisión de datos con bajos requerimientos de ancho de banda y bajas tasas de velocidad. Con una frecuencia de 2.4 GHz es posible alcanzar velocidades de datos nominales de 250 Kbps, mientras que para las frecuencias de 915 MHz y 868 MHz se alcanzan velocidades de 40 Kbps y 20 Kbps respectivamente. Por otro lado, debido a que esta tecnología tiene su campo de aplicación sobre entornos de área personal la distancia alcanzada con los enlaces es de aproximadamente 10 metros. Por tales razones, se considera que no es una tecnología adecuada para el transporte de VoIP en una red en malla de un entorno rural, pues este servicio requiere en promedio, una velocidad, rendimiento, alcance y ancho de banda mayores.

El protocolo IEEE 802.11 recoge distintas velocidades según el modo de funcionamiento: 1, 2, 5.5 y 11 Mbps para 802.11b; 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps para 802.11a, y el conjunto de todas las anteriores para el modo 802.11g. Estos modos utilizan diferentes tipos de modulación y codificación, de forma que cuanto mayor sea la velocidad, mayor es la potencia necesaria en recepción para mantener un enlace con una Tasa de Errores de Bits (*Bit Error Rate*, BER) baja; por lo tanto, si se quiere lograr enlaces de larga distancia (como los presentes en un entorno rural) con una cierta estabilidad es necesario utilizar velocidades bajas. Si además se tiene en cuenta que la banda de 2.4 GHz impone limitaciones en cuanto al nivel de potencia que es legal transmitir, es fácil comprobar que para enlaces muy largos normalmente deben utilizarse las velocidades más bajas de 802.11b.

Existe una confusión considerable respecto a la tasa de transmisión actual de un canal WiMAX pues originalmente se anunció como una tecnología que podría entregar 70 Mbps y extender la cobertura a 50 Kilómetros. Sin embargo, para lograr este nivel de rendimiento, se requiere de una tecnología punto a punto inalámbrica fija con LOS y antenas direccionales, lo cual limita dicha velocidad a escenarios fijos y la hace poco posible en entornos móviles. En general, esta tasa dependerá del ancho de banda del canal asignado y de cómo pueda emplearse eficientemente.

3.3.1.4 Aplicación de diversidad de antenas

Con el fin de incrementar la capacidad y mitigar el efecto de desvanecimiento, el retardo y la interferencia co-canal, se han desarrollado sistemas de múltiples antenas que mejoran la calidad en la transmisión y recepción. Existen técnicas como la diversidad de antenas o antenas inteligentes, como los mencionados en la sección 1.8.3.2, que podrían ser aplicables a las redes en malla, sin embargo, su comportamiento en este tipo de redes aun se encuentra en evaluación, además, el costo y complejidad de los sistemas actuales son muy altos.

Por esta razón, el mecanismo de antenas direccionales es el más utilizado en el momento y es recomendable que para aquellas tarjetas inalámbricas que tienen dos conectores para antena exterior, se desactive la diversidad y se trabaje con una única antena para transmisión/recepción, pues algunas pruebas como las realizadas en [77] muestran que aunque una antena transmita por sólo uno de los conectores puede ocurrir perderse una pequeña potencia por el otro.

3.3.1.5 Cantidad de interfaces

Como se menciona lo largo de todo el documento, para mejorar el comportamiento de una red en malla es necesario que al menos se cuente con dispositivos que tengan doble interfaz. Esto se debe a que un nodo con una única frecuencia sería sumamente ineficiente pues la cobertura provista por todos los APs estaría sobrepuesta (es decir, sus celdas estarían traslapadas). En este entorno, cualquier comunicación iniciada por un AP o un cliente puede interferir con cualquier otra comunicación.

Con la implementación de múltiples interfaces es posible separar los dos principales tipos de tráfico en el dominio inalámbrico: mientras el enrutamiento y la configuración se realizan entre los MAPs, el acceso a la red de los usuarios finales puede llevarse a cabo en un radio diferente, lo cual mejora significativamente la capacidad de la red.

La totalidad de dispositivos en malla basados en la tecnología ZigBee que se encuentran en el mercado, son sistemas de un solo radio que no pueden realizar una separación de tráfico, lo cual introduce un retardo notable en cada salto. Debido a que todos los saltos utilizan el mismo canal, una interferencia introducida en cada salto extra reduce a la mitad el ancho de banda total disponible y por lo tanto, después de unos pocos saltos la voz y los datos empiezan a retardarse.

En el mercado de las redes inalámbricas en malla basadas en los estándares IEEE 802.11x es posible encontrar diversos productos con un solo radio o múltiples radios tanto para el tráfico de *backhaul* como para el acceso de los clientes. En la Tabla 3-2 se relacionan las empresas más sobresalientes en este mercado y la cantidad de radios soportados por cada uno de sus productos.

TABLA 3-2. CANTIDAD DE RADIOS SOPORTADOS POR LOS PRODUCTOS 802.11X

Empresa	Producto	Cantidad de radios	Puertos Ethernet
BelAir Networks	BelAir100C	Hasta 2 radios con tecnologías 802.11b/g u 802.11a para el acceso y 802.11a/b/g, pre-WiMAX ó WiMAX para el <i>backhaul</i>	8
	BelAir 200	Hasta 4 radios con tecnologías 802.11b/g/a para el acceso y 802.11b/g/a, pre-WiMAX ó WiMAX para el <i>backhaul</i>	8
	BelAir 300	Hasta 6 radios con tecnologías 802.11b/g/a y GSM para el acceso y 802.11a/b/g, pre-WiMAX ó WiMAX para el <i>backhaul</i>	8
Cisco	Aironet 1500	Hasta 2 radios con tecnologías 802.11b/g para el acceso y 802.11a para el <i>backhaul</i>	1
Firetide	HotPort 3203	Hasta 2 radios con tecnologías 802.11b/g para el acceso y 802.11a para el <i>backhaul</i>	2
Nortel	Wireless AP 7220	1 radio con tecnología 802.11b/g para el acceso y 1 radio con tecnología 802.11a para el <i>backhaul</i>	1
Strix Systems	OWS 3600-20	2 radios 802.11a y 2 radios 802.11g	1
	OWS 3600-30	3 radios 802.11a y 3 radios 802.11g	1
Tropos Networks	5320 MetroMesh Router	1 radio con tecnología 802.11b/g/a para el acceso y <i>backhaul</i>	1
MeshDynamics	MD4458-AABB	2 radios con tecnología 802.11b/g para el acceso y 4 radios con tecnología 802.11a para el <i>backhaul</i>	2
Meshnode	Meshnode	2 radios con tecnología 802.11b/g/a para el acceso y <i>backhaul</i>	1

AirMatrix	WISP-ODMESH-DB-1-2-ABG-400a/100g-DaDg	1 radio con tecnología 802.11b/g y 1 radio con tecnología 802.11a	1
LocustWorld	Meshbox	1 radio con tecnología 802.11b	1
Linksys	WAP55AG	2 radios con tecnología 802.11b/g/a para el acceso y <i>backhaul</i>	1

Por su parte, el estándar en desarrollo IEEE 802.11s tiene en cuenta dispositivos de uno o múltiples radios e implementa un *framework* de canal común que permite la operación multicanal de todos los dispositivos.

Como puede observarse en la Tabla 3-2, el equipo BelAir 300 es el único en el mercado que implementa radios con la tecnología WiMAX (IEEE 802.16-2004) para el tráfico de *backhaul*, lo cual puede ser provechoso en implementaciones que requieren grandes anchos de banda en el *core*¹⁴ de la red. Sin embargo, por la inexistencia de otras soluciones comerciales con esta tecnología, no es posible generar un punto de comparación en cuanto a la cantidad de radios disponibles para estos nodos.

3.3.1.6 Cobertura alcanzada

Uno de los principales objetivos de las redes inalámbricas en malla es aumentar el rango de cobertura a partir de la implementación de múltiples saltos, lo cual es provechoso en escenarios rurales donde las áreas comprendidas involucran varios cientos de kilómetros.

Es evidente que entre más número de saltos contenga la red, mayor será el área que pueda cubrir, sin embargo, también se sabe que a medida que el tamaño de la red aumenta, el desempeño de la red se degrada significativamente, razón por la cual, las tecnologías inalámbricas en malla deben contar con protocolos de enrutamiento, transporte y acceso al medio lo suficientemente escalables y robustos para controlar la incidencia del número de saltos y la distancia entre ellos sobre la calidad de la información.

Aunque hasta el momento no se encuentran referencias acerca del número de nodos que puede soportar una red en malla bajo el estándar IEEE 802.15.4, se sabe que una red ZigBee convencional puede constituirse hasta por 255 nodos que alcanzan cada uno una distancia de transmisión de aproximadamente 10 a 30 metros dependiendo de la salida de potencia y las características ambientales.

En cuanto al alcance de las tecnologías IEEE 802.11x, se observa que las soluciones propietarias de redes en malla desarrolladas hasta el momento permiten cubrir cientos de kilómetros cuadrados con la suficiente eficiencia como para prestar servicios de VoIP e Internet móvil a una velocidad comparable con la de la tecnología DSL. Ejemplos de estas redes se implementan en la ciudad de Chaska, Minnesota, donde existe una red en malla de 230 nodos que cubre un área de 25 km², o en la ciudad de Tempe, Arizona, en la cual se tiene alrededor de 400 nodos Strix para cubrir un área de 64 Km².

En comparación con los productos del mercado existentes, el estándar en desarrollo IEEE 802.11s espera promover la idea de crear un núcleo de protocolos que trabajen con pequeñas mallas de alrededor de 32 nodos estáticos, pero en el contexto de un *framework* extensible que permita que muchos otros modelos de malla diferentes puedan implementarse. Esto daría lugar a implementar diferentes tecnologías, pero siempre de manera que interoperen limpiamente con los protocolos del núcleo.

Como se mencionó anteriormente, hasta el momento no se encuentra registro alguno de implementaciones de redes en malla basadas en el estándar IEEE 802.16-2004. No obstante, en el estudio del desempeño de la red en malla cuando se utiliza un esquema de alerta de interferencias (*interference-aware scheme*) que se realiza en [73] se tiene en cuenta un rango de 10 a 20 nodos para su evaluación y se puede observar que el mejor desempeño se obtiene para una cantidad de 8 a

¹⁴ Parte principal de la red de comunicaciones que maneja grandes volúmenes de datos a grandes distancias

12 nodos, mientras que en el realizado con el algoritmo de transmisiones concurrentes en [74] se toma como rango de evaluación de 20 a 120 nodos y el valor de desempeño máximo se obtiene con un total de 70 nodos aproximadamente.

3.3.2 Nivel de Enlace de Datos

3.3.2.1 Soporte de calidad de servicio

A diferencia de las aplicaciones para la transmisión de datos, las aplicaciones de tiempo real tales como el transporte de VoIP, necesitan realizarse con un mínimo de ancho de banda y retardo. De no conseguirse estos recursos las comunicaciones van a peligrar hasta el punto de no ser realizables. Es por tanto necesario garantizar una calidad de servicio mínima frente las comunicaciones de datos y a otras comunicaciones de tiempo real, a través del desarrollo de nuevos protocolos que evalúen medidas de QoS tales como el retardo, la tasa de pérdida de paquetes y el *jitter*.

Debido a que el estándar IEEE 802.15.4 se enfoca en el desarrollo de aplicaciones de bajas velocidades, con requerimientos reducidos de ancho de banda, tales como aplicaciones para la transmisión de señales en ambientes industriales y domótica, no existe tratamiento alguno de calidad de servicio y por lo tanto, son muy poco utilizadas para los servicios de tiempo real tales como la transmisión de VoIP.

En el estándar IEEE 802.11, hasta la reciente aprobación del estándar 802.11e, no se tenía soporte de QoS. Aún así, todavía se trata de un estándar joven y son pocas las tarjetas inalámbricas que lo implementan de forma práctica. El estándar 802.11e propone la diferenciación de clases de tráfico a partir de la variación de la ventana de contienda y el espacio entre tramas, todo ello según la prioridad del flujo a que pertenece cada paquete.

En los equipos en los cuales no es posible aplicar métricas de QoS del estándar 802.11e existe la posibilidad de implementar QoS a través de ciertos procedimientos técnicos de control avanzado del tráfico en la capa IP (nivel de red) con lo cual es posible darle un tratamiento diferenciado a los distintos tipos de tráfico. La explicación de estos métodos se presenta en la sección 3.3.3.1 de este capítulo.

Para proveer calidad de servicio en las redes en malla del estándar propuesto IEEE 802.11s las tramas de datos se transmiten desde un MP a otro utilizando como base el formato de cuatro direcciones del estándar IEEE 802.11-1999 extendido con un campo de encabezado de QoS que sigue las especificaciones del estándar IEEE 802.11e y un nuevo campo para el control de reenvío en la malla.

En la propuesta conjunta se propone el uso del protocolo EDCA, que se especifica en el estándar IEEE 802.11e como base para los mecanismos de acceso al medio del estándar 802.11s. A través de EDCA es posible definir ocho niveles de prioridad de acceso para el canal inalámbrico compartido. La propuesta para el nuevo estándar 802.11s presenta además, una serie de recomendaciones para optimizar EDCA en los puntos de malla sin tener que cambiar los mecanismos básicos de acceso al medio (dichas recomendaciones se detallan en el Anexo B). A través de estos mecanismos es posible realizar priorización de tráfico, utilizar métricas de selección de rutas con QoS y especificar mecanismos de control de flujo y congestión para conseguir la calidad de servicio requerida en cada flujo.

En una topología de malla del estándar IEEE 802.16-2004 la calidad de servicio se proporciona sobre los enlaces paquete por paquete utilizando el CID de la malla. De esta manera, un nodo de la malla obtiene su parámetro de calidad de servicio: *AuthorizedQoSParamSet* durante la transferencia de los parámetros operacionales. No existen parámetros o servicios de QoS asociados a un enlace, por el contrario, cada mensaje *unicast* contiene los parámetros del servicio en su encabezado. La clasificación del tráfico y regulación del flujo del nodo que ingresa se realizan por un protocolo de clasificación y regulación del nivel superior. Los parámetros de servicio asociados con cada mensaje se comunicarán junto con el contenido del mensaje a través del SAP-MAC.

Cabe mencionar que en la propuesta para la conexión de redes 802.16 en malla [78] se habla de las limitaciones que tiene el actual estándar para el soporte de QoS debido a que éste se basa en un nivel

MAC no orientado a la conexión y por lo tanto es difícil garantizar la calidad de servicio para aplicaciones de tiempo real.

3.3.2.2 Seguridad

Las redes inalámbricas en malla representan un nuevo concepto de red y por lo tanto introducen nuevos requisitos de seguridad que se presentan principalmente por las comunicaciones inalámbricas multitrayecto y por el hecho de que los MPs no se protegen físicamente. El multitrayecto retarda la detección y tratamiento de los ataques, hace del enrutamiento un servicio de red crítico y puede conducir a varias inequidades entre los MPs, mientras que, la exposición física de los MPs permite al adversario capturar, clonar o sabotear los datos que llevan estos dispositivos.

Aunque el diverso rango de aplicaciones a las que el estándar IEEE 802.15.4 se dirige imponen restricciones significativas en el momento de requerir una implementación básica de seguridad en el subnivel MAC, son necesarias algunas funcionalidades de seguridad para proporcionar los servicios de seguridad básicos y la interoperabilidad entre todos los dispositivos implementados en el estándar. Esta base incluye la capacidad de mantener una Lista de Control de Acceso (*Access Control List, ACL*) y utilizar una criptografía simétrica para proteger las tramas transmitidas. La gestión de claves, autenticación del dispositivo y protección de refrescos (*freshness protection*) pueden proporcionarse por los niveles superiores, pero están fuera de alcance de este estándar.

ZigBee proporciona servicios de seguridad para el control de acceso, codificación de los datos, integridad de las tramas y refrescos secuenciales en el reenvío de tramas. Además, define tres modos de seguridad: modo inseguro, modo ACL y modo seguro que se diferencian por el tipo de servicios suministrados.

Los promotores del estándar IEEE 802.11 han realizado grandes esfuerzos para mejorar los sistemas de seguridad de sus redes inalámbricas. Inicialmente los productos de Wi-Fi incluían el protocolo de encriptación denominado Privacidad Equivalente Cableada (*Wired Equivalent Privacy, WEP*) con el fin de proteger los datos que se transmiten en una conexión inalámbrica mediante cifrado, sin embargo, en el momento se considera que este método no es confiable pues existen diversas herramientas gratuitas para romper la clave secreta de enlaces protegidos con WEP.

De la necesidad de mejorar este mecanismo de seguridad nace un nuevo estándar denominado Acceso Wi-Fi Protegido (*Wi-Fi Protected Access, WPA*) que propone un nuevo protocolo para cifrado, conocido como el Protocolo de Integridad de Clave Temporal (*Temporal Key Integrity Protocol, TKIP*), el cual se encarga de cambiar la clave compartida entre punto de acceso y cliente cada cierto tiempo, para evitar ataques que permitan revelar la clave. Además, incorpora un mecanismo de autenticación a través del estándar 802.1X y el Protocolo de Autenticación Extensible (*Extensible Authentication Protocol, EAP*).

Finalmente, en junio de 2004 se ratificó el estándar 802.11i también conocido como WPA2, que mejora considerablemente los problemas de seguridad de las WLAN. Este estándar se basa en una técnica de encriptación más robusta llamada Estándar de Encriptación Avanzado (*Advanced Encryption Standard, AES*).

Los mecanismos de seguridad mencionados anteriormente operan a nivel de enlace. Pero existen otras vías de añadir más seguridad al sistema WLAN a otros niveles, tales como la identificación de las direcciones MAC de los clientes (nivel 2), la construcción de Redes Privadas Virtuales (*Virtual Private Network, VPN*) entre el cliente y el servidor correspondiente (nivel 3) o incluso la adición de seguridad a niveles más altos (utilización de ssl, ssh, etc.), con lo que en la práctica puede decirse que la pasarela de seguridad está suficientemente consolidada.

El nuevo estándar para la conexión inalámbrica en malla IEEE 802.11s utilizará los mecanismos de asociación, autenticación y encriptación definidos por el estándar IEEE 802.11i, o una extensión de ellos, con el propósito de asegurar un ESS en configuración de malla en el que todos el APs se controlan por una sola entidad administrativa lógica de seguridad.

En general, el protocolo 802.11i se utilizará para asegurar la topología y el intercambio de mensajes de datos, control e información de enrutamiento entre todos los participantes de la malla. La

administración de claves, el soporte de claves dinámicas y estáticas así como la autenticación centralizada o distribuida se realizará a través de procedimientos basados en el estándar 802.1X.

El estándar IEEE 802.16 incluye medidas para privacidad y criptografía inherentes en el protocolo. Este estándar implementa la autenticación de los dispositivos con certificados X.509 utilizando el Estándar de Encriptación de Datos Triple (*Triple Data Encryption Standard, 3DES*) de 168 bits, como se emplea en los túneles de VPN más seguros. Además, se prevé la implementación de AES para evitar las fallas de seguridad que en sus inicios presentó Wi-Fi.

3.3.2.3 Manejo de conservación de energía

Esta característica es uno de los puntos a favor del estándar IEEE 802.15.4, pues a pesar de que los dispositivos funcionan con baterías, su autonomía es tan elevada que es posible trabajar con las mismas baterías por años, ya que, pueden programarse para que sólo se despierten durante frecuencias de segundo para la emisión y la recepción.

Los dispositivos de los nodos pueden despertarse solamente cuando se transmite una señal de guía o *beacon*, escuchar la dirección de destino y si no corresponde a la suya, volver al estado dormido, con el consecuente ahorro de energía. Las tramas *beacon* son importantes en las redes en malla y árbol de grupos de celdas para mantener todos los nodos sincronizados sin requerir que los nodos consuman energía de la batería, escuchando durante largos periodos de tiempo. Pruebas con ZigBee afirman que las baterías pueden durar de cinco a diez años.

Del lado de la tecnología 802.11 se sabe, que las redes inalámbricas se relacionan generalmente con aplicaciones móviles en las cuales la potencia de las baterías es un recurso escaso. Por esta razón el estándar trata directamente el problema de ahorro de potencia y define un mecanismo completo para permitir que estaciones entren en un estado de reposo por largos periodos de tiempo sin perder la información.

Este modo de funcionamiento implicará que la estación se “despertará” sólo en determinados momentos para conectarse a la red. Estas estaciones se denominan Estaciones con Conservación de Energía (*Power Save Station, PS-STAs*) y estarán a la escucha de determinadas tramas como la de portadora entre otras. El control de este tipo de estaciones lo llevará el punto de acceso, que tendrá conocimiento de qué estación se asocia en este modo.

El punto de acceso almacenará los paquetes que le lleguen con destino a los nodos limitados de potencia. Por tanto, el punto de acceso mantendrá un mapa de paquetes almacenados y los destinos a quienes tendrá que repartirlos o enviarlos.

Cuando el punto de acceso decida enviarle el paquete lo hará enviándole una trama denominada Mapa de Indicación de Tráfico (*Traffic Indication Map, TIM*) a la estación para que despierte en el próximo intervalo de portadora. De esta manera, estas estaciones recibirán la información con un desgaste mínimo de potencia.

El estándar IEEE 802.16-2004 no implementa algún mecanismo de conservación de energía, sin embargo, desarrolla una técnica de Control de Potencia de Transmisión (*Transmission Power Control, TPC*) que permite ajustar adaptativamente la potencia de un transmisor para mantener el nivel de señal recibido en un rango deseado. Los algoritmos de TPC se implementan en la estación base, que envía a las estaciones subscriptoras la información relacionada para regular el nivel de potencia de transmisión (en recepción éste es un valor predeterminado), reduciendo así todos los consumos de potencia en la estación subscriptora y la interferencia con otras estaciones base. Con control de potencia, la PIRE se reduce de acuerdo al margen del enlace (niveles de potencia transmitida proporcionales a los rangos de distancia del enlace). Sin embargo, como el control de potencia también se afecta por los niveles de portadora contra interferencia (C/I), se recomienda emplearla, en donde sea posible, junto con DFS, pues tiende a ser la técnica más efectiva de mitigación de interferencia.

3.3.3 Nivel de Red

3.3.3.1 Diferenciación de tráfico

Como se observó en la sección 3.3.2.1, además de la utilización del protocolo 802.11e para asegurar QoS en las redes WLAN, es posible implementar otras técnicas a nivel de red que permiten conmutar de forma diferenciada tráfico con distintas prioridades, y en particular voz y datos, de manera que el tráfico de voz se pueda cursar con calidad razonable aunque la red soporte una alta carga de tráfico de datos.

De hecho, varios estudios realizados en torno a la QoS sobre redes inalámbricas para entornos rurales tales como [77] [79] [80], afirman que el uso de 802.11 en redes exteriores y con distancias de varios kilómetros entre los nodos da lugar a fluctuaciones en las prestaciones de la red que comprometen aún más la calidad de servicio. Por todo ello, es más conveniente el uso de redes *ad hoc* que pasan la lógica de conmutación al nivel de red, en el que sí que se soporta QoS.

Actualmente existen dos arquitecturas para ofrecer QoS sobre el nivel de red que tienen el respaldo de todo un conjunto de estándares y de desarrollos: Servicios Integrados (*INTEgrated SERVICES*, INTSERV), normalmente asociados al uso del Protocolo de Reserva de Recursos (*Resource ReSerVation Protocol*, RSVP), y Servicios Diferenciados (*DIFFerentiated SERVICES*, DIFFSERV).

INTSERV realiza una reserva previa de los recursos antes de establecer la comunicación entre dos puntos; si todos los nodos que forman el camino entre esos dos puntos pueden comprometer los recursos necesarios para proporcionar la calidad requerida entonces la comunicación puede realizarse. De esta manera cada nodo tratará de forma particular a cada paquete de ese flujo hasta que termine la conexión. DIFFSERV por su parte, propone que en cada nodo puedan identificarse diferentes clases de tráfico, recibiendo un trato más o menos prioritario a partir de esa diferenciación. Los nodos periféricos a la red se encargan de clasificar cada paquete entrante en una de las clases definidas para que los enrutadores que recorra el paquete le den el tratamiento apropiado; se produce por lo tanto una agregación de flujos. De esta forma, ante el caso de que la red se encuentre congestionada, se llega a obtener un resultado preferente para el tráfico prioritario frente a los demás.

3.3.3.2 Protocolos de enrutamiento

Los protocolos de enrutamiento deberán proporcionar distintos mecanismos para el descubrimiento de caídas de enlaces, balanceo de cargas proporcionando QoS y además, en función del tipo de WMN (móvil, fija o híbrida) que se desee implementar los protocolos diferirán, ya que muchas de las propiedades de auto configuración y auto reparación de rutas de este tipo de redes, son en parte proporcionadas por los distintos protocolos de enrutamiento.

Cuando el nivel de movilidad en una red inalámbrica en malla es alto, los protocolos (proactivos o reactivos) desarrollados por el grupo de trabajo MANET del IETF, tales como OLSR, TBPRF, DSR y AODV son los más adecuados implementar. Por otro lado, si no existe nivel de movilidad en la red, pueden emplearse protocolos de las redes fijas, que tengan la capacidad de reestablecer las rutas en caso de caída de algún enlace. Sin embargo, puede darse el caso de que el nivel de movilidad de la red sea medio, por lo tanto el uso de un protocolo híbrido puede ser eficiente, donde el protocolo puede ser proactivo hacia los MAPs cercanos y reactivo hacia los MAPs lejanos.

Otra alternativa de enrutamiento para redes inalámbricas en malla es el uso de protocolos de enrutamiento adaptativos, cuyo comportamiento se modifica dinámicamente al monitorear el cambio en los parámetros de la red. Esto podría permitir el uso de protocolos reactivos en redes pequeñas con poca movilidad y adoptar protocolos proactivos cuando la red crece en tamaño y movilidad, sin embargo el protocolo modifica este comportamiento en tiempo real tal como la red cambia su topología.

3.4 CRITERIOS DE DISEÑO

3.4.1 Configuración del Enlace

En esta fase se determina el perfil del trayecto, básicamente identificando la topología total del sistema y la ubicación de los extremos a interconectar.

La primera consideración que debe tenerse en cuenta en el momento de seleccionar los puntos de la malla es que la mayoría de tecnologías inalámbricas requieren de línea de vista directa entre los dos puntos que unen el enlace. Este criterio es aún más restrictivo, ya que debe asegurarse que por lo menos el 60% del radio de la primera zona de Fresnel¹⁵ esté despejado para que la señal inalámbrica sufra menor atenuación. Por lo tanto, se debe evitar que los enlaces atraviesen vegetación abundante, pues aunque en el momento de la instalación se obtenga en recepción un nivel de señal suficiente, con el tiempo esta vegetación puede volverse más densa o variar en alguna de sus características, por ejemplo tener una densidad de agua mayor en caso de lluvia, lo que influirá de manera especial en la absorción de la señal.

Con el objetivo de evitar los árboles, la altura mínima sobre el nivel del suelo a la que debe colocarse cualquier antena en un nodo cliente debe ser de al menos 10 m. En el caso de que una estación final esté apuntando a un retransmisor ubicado en un cerro y se tenga la certeza de que la línea de vista está despejada, las alturas mínimas en estaciones clientes y retransmisores debe ser de 6 m. La altura máxima de la torre es de 40 m, sin embargo, debe evitarse llegar a este valor y sólo recurrir a él en última circunstancia.

Debido a las características geográficas de un entorno rural, es muy probable que algunas poblaciones se encuentren situadas en puntos muy bajos difíciles de enlazar con un solo salto, razón por la cual habrá que ubicar pequeñas montañas situadas a decenas o centenares de metros, donde podrían situarse elementos retransmisores relativamente vigilados y mantenibles. Incluso dentro de la misma población, el lugar más alto puede ser un edificio distinto (quizá la iglesia o la alcaldía), donde se puede emplazar un retransmisor.

Aunque es deseable que todos los nodos retransmisores estén cerca de una población que pueda encargarse de su vigilancia y cuidado, habrá ocasiones en que no sea posible y sea necesario ubicarlos en lugares altos alejados de cualquier núcleo habitado, en este caso, es recomendable buscar puntos donde ya existan otras torres de radioenlaces, televisión, etc, que pueden utilizarse de mutuo acuerdo. Este criterio se plantea para evitar problemas tanto de accesibilidad con material, como de seguridad física de los equipos (posibles robos).

3.4.2 Levantamiento del Sitio

Después de seleccionar los puntos a emplazar es necesario realizar un estudio de la topografía del terreno y determinar el alcance de los niveles de interferencia en las frecuencias de interés, así como la severidad de las obstrucciones y la multitrayectoria en las ubicaciones precisas donde se desea instalar los nodos.

El primer paso de este proceso es la corroboración de la línea de vista entre cada uno de los nodos y el cálculo de la zona Fresnel. Para tal fin, se puede hacer uso de mapas cartográficos a escala 1:250.000 o 1:100.000 (que para el caso de Colombia se encuentran disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)) sobre los cuales debe localizarse cada uno de los puntos, identificar las posibles obstrucciones del trayecto y realizar manualmente el cálculo de la zona Fresnel, o utilizar herramientas *software* que a través de mapas digitales, sistemas de información geográfica y herramientas de cálculo, permiten determinar la condición de LOS, las pérdidas de propagación, interferencias, etc.

¹⁵ Zona Fresnel: consiste en una serie de círculos concéntricos alrededor de un punto central de transmisión, en que cada círculo se define por la relación de fase entre el haz principal y dos lóbulos laterales dominantes. Las fluctuaciones de fase entre una zona y otra, hacen que las reflexiones del lóbulo lateral lleguen en fase o no con el lóbulo principal en recepción.

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, los mapas cartográficos contienen datos muy precisos de alturas y obstrucciones presentes, sin embargo, si se trata de una red en malla con múltiples puntos, el uso de estos mapas y el cálculo manual de la zona Fresnel para cada uno de los enlaces puede tornarse en algo engorroso y demorado, además se pueden presentar algunos errores en el momento de realizar los cálculos manuales. Por otro lado, no todas las regiones están presentes en los mapas porque algunas de ellas permanecen con nubosidad constante y es imposible determinar sus curvas de nivel, o la información de esa zona está reservada únicamente para uso militar. El uso de herramientas *software* y mapas digitales puede agilizar el proceso del cálculo de LOS, zona Fresnel y demás interferencias, además permite variar ciertos parámetros como la potencia de transmisión, ubicación y ganancia de las antenas, sensibilidad de los equipos, entre otros, para conseguir un enlace con buena integridad. No obstante, hay que tener en cuenta que algunos de los mapas digitales no utilizan el mismo sistema de coordenadas de Colombia, lo cual puede introducir errores en la ubicación de los puntos.

Cabe notar que cualquiera de los anteriores métodos puede utilizarse para lograr una primera aproximación del diseño de la red, sin embargo, es sumamente necesario comprobar los datos obtenidos realizando visitas a la zona. Esto se debe principalmente a que la información que suelen dar este tipo de herramientas es de tipo orográfico. De esta forma pueden aparecer elementos en escena como edificios u otro tipo de construcciones y diversos tipos de vegetación. En la visita al terreno se deben tomar fotos del entorno, así como medidas de latitud y longitud (a partir de un Sistema de Posicionamiento Global (*Global Positioning System, GPS*)) para un análisis posterior.

Una vez se estable un primer modelo de red es necesario evaluar los márgenes de interferencia de cada uno de los enlaces; para este procedimiento puede recurrirse a analizadores de espectro, *software* especializado funcionando sobre los equipos de radio y otros instrumentos de precisión capaces de sintonizar las bandas de frecuencia y de detectar actividades en bandas cercanas que puedan afectar las transmisiones en las bandas elegidas. Este estudio permitirá comprobar la integridad de cada enlace y su conveniencia para prestar servicios de interconexión.

Finalmente, debe determinarse la confiabilidad del enlace de interconexión a partir del cálculo de la potencia de recepción en cada uno de los extremos y el Margen Operativo del Sistema (*System Operative Margin, SOM*) o margen de desvanecimiento, que es la diferencia entre el nivel de potencia en recepción y la sensibilidad mínima requerida en el equipo receptor para obtener una transmisión con menor probabilidad de errores, siendo una herramienta muy útil para verificar la factibilidad y conveniencia de los enlaces; se recomiendan valores de SOM positivos, superiores a los 10 dB pues por debajo de dicho rango supone condiciones críticas de desempeño del sistema.

3.4.3 Selección de Equipos

Dadas las condiciones geográficas, climáticas y económicas de la zona rural, algunas de las consideraciones que se deben tener en cuenta en el momento de realizar la selección de los equipos son las siguientes:

- **Bajo costo:** No se puede implementar soluciones de un alto costo que no sean sostenibles en el mediano y largo plazo por las comunidades objetivo de este proyecto.
- **Necesidad de equipos robustos ante condiciones meteorológicas adversas:** Debido a que muchos de estos dispositivos deben instalarse en zonas de selva y alta montaña con unas características ambientales muy duras, generalmente con temperaturas y humedades extremas.
- **Disponibilidad de compra en el medio/largo plazo:** Este requisito resulta especialmente importante, ya que es necesario asegurar de alguna manera que el *hardware* seleccionado se distribuirá en el mediano y largo plazo. Es recomendable tener posibles alternativas localizadas en caso de que sea necesario llegar a utilizarlas.
- **Otros factores:** En general, es recomendable tener en cuenta aspectos como el rango de cobertura y desempeño ofrecidos, la facilidad de instalación y gestión, la portabilidad y compatibilidad con otras redes, el consumo de potencia, la interoperabilidad de los dispositivos inalámbricos, la protección humana, el cumplimiento de estándares, la capacidad de gestión, el servicio post-venta y posible soporte técnico del proveedor.

Para finalizar este capítulo, en la Tabla 3-3 se recopila los criterios establecidos con su correspondiente descripción.

TABLA 3-3. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS EN MALLA FIJAS PARA ENTORNOS RURALES

Criterio planteado		Descripción
CRITERIOS DE NEGOCIO	Visión general del Mercado	Se recomienda identificar el mercado hacia el cual se dirige la aplicación, así como los tipos de servicios y usuarios que los demandan, esto permitirá identificar cuál es la tecnología que más se ajusta a los requerimientos de la solución a implementar
	Implementaciones actuales de las WMNs	Es importante observar cuál tecnología presenta un mayor desarrollo y aceptación en el mercado pues esto asegura que la solución implementada tendrá proyección en el futuro, apoyo de la industria y habrá disponibilidad de sus equipos a mediano y largo plazo
CRITERIOS TECNOLÓGICOS	Espectro	Para la escogencia del tipo de espectro que se utilizará en la aplicación final es importante observar el tipo de escenario, presupuesto económico del proyecto y normas regulatorias de cada país
	Canales sin traslape	Es necesario utilizar canales sin traslape sobre la tecnología inalámbrica para reducir los niveles de interferencia y mejorar la capacidad de la red. Además hay que tener en cuenta el ancho de canal suministrado por cada tecnología pues este permite determinar la cantidad de información que se puede enviar en cada comunicación
	Velocidad	Es preciso identificar que velocidad soporta cada una de las tecnologías para determinar el tipo de aplicaciones que se implementarán en la red
	Aplicación de diversidad de antenas	Pese a que en estos momentos se están desarrollando sistemas de múltiples antenas que mejoran la calidad en la transmisión y recepción y disminuyen el efecto de desvanecimiento, el retardo y la interferencia co-canal; no se recomienda su utilización para las WMNs actuales porque aun se encuentran en una etapa de evaluación y el costo y complejidad de los sistemas actuales son muy altos
	Cantidad de interfaces	Para asegurar el buen funcionamiento de las redes inalámbricas en malla se recomienda escoger equipos con al menos dos interfaces diferentes que permitan separar los distintos tipos de tráfico que se presentan en la red
	Cobertura alcanzada	La distancia entre los nodos que alcanza cada una de las tecnologías así como la cantidad máxima de saltos soportados, permite observar el área de cobertura que alcanzará la solución final
	Soporte de calidad de servicio	Cuando se desea suministrar servicios de tiempo real es importante escoger tecnologías que implementen mecanismos de calidad de servicio para garantizar comunicaciones adecuadas de extremo a extremo
	Seguridad	Para garantizar la seguridad en cada uno de los puntos de las WMNs teniendo en cuenta aspectos como el multitrayecto y la exposición física de sus nodos, es preciso implementar tecnologías con sistemas de autenticación y encriptación robustos
	Manejo de conservación de energía	El ahorro de energía en cada punto es de vital importancia en entornos rurales donde generalmente hay problemas con el suministro de electricidad, por tal razón, se recomienda el uso de tecnologías que implementen mecanismos para la conservación de la energía
	Diferenciación de tráfico	En caso de no poder asegurar calidad de servicio a nivel de enlace por incompatibilidad de los equipos, se recomienda estudiar otros mecanismos que pueden implementarse en el nivel de red como DIFFSERV o INTSERV
	Protocolos de enrutamiento	Es necesario identificar el nivel de movilidad de la red a implementar con el fin de determinar cuál es el tipo de protocolo de enrutamiento más adecuado y de esta manera mejorar el desempeño de la red
CRITERIOS DE DISEÑO	Configuración del enlace	En esta fase se debe tener en cuenta la buena ubicación de los puntos de interconexión y la altura de los mismos para asegurar la disponibilidad de los enlaces a mediano y largo plazo
	Levantamiento del sitio	Dadas las condiciones de las tecnologías inalámbricas utilizadas se recomienda que en esta fase se asegure una línea de vista directa entre los puntos de interconexión y se garantice un SOM superior a los 10 dB
	Selección de equipos	Debido a las limitaciones de un entorno rural se requiere utilizar equipos con ciertas características en cuanto a costos, disponibilidad y robustez ante condiciones meteorológicas adversas

Con el análisis previo y completo de cada una de las tecnologías IEEE en su modo de operación en malla realizado en el capítulo 2 y después de definir los criterios para el diseño de este tipo de redes en entornos rurales, se logró establecer unas pautas que permitirán en el siguiente capítulo escoger la tecnología, el protocolo de enrutamiento y el codec de audio más adecuado para el transporte de voz en este tipo de redes y de esta manera definir un modelo de red aplicado al entorno geográfico del proyecto de EHAS-Silvia realizando cada uno de los pasos de la ingeniería de radioenlace.

4. DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA FIJA EN CONFIGURACIÓN DE MALLA PARA EL TRANSPORTE DE VOZ APLICADO AL ENTORNO GEOGRÁFICO DEL PROYECTO DE EHAS-SILVIA

Hasta el momento, se ha hecho un estudio profundo de las características y funcionamiento de las redes inalámbricas en malla y como puede observarse, este tipo de redes presentan múltiples ventajas que pueden ser útiles en diversas aplicaciones dirigidas tanto a redes de área personal, como local o metropolitana. La interconexión de entornos rurales es un escenario de aplicación bastante interesante de las WMNs, pues debido a las condiciones geográficas, económicas y técnicas que impone este ambiente, es necesario buscar una solución de interconexión que sea bastante flexible, autoconfigurable, escalable y económica. Como se observó en el capítulo 1, tales condiciones son precisamente las características que diferencian y resaltan a las redes inalámbricas en malla y por lo tanto resulta interesante analizar su comportamiento y comprobar su efectividad.

Para tal fin, en el presente capítulo se seleccionan las tecnologías adecuadas para la implementación de una red inalámbrica en malla fija para el transporte de voz en un entorno rural y posteriormente se realiza el diseño de una WMN sobre el entorno geográfico que comprende una de las microredes del proyecto de EHAS-Silvia.

4.1 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Para realizar la selección de la tecnología adecuada para la interconexión de la red EHAS-Silvia, se tendrá en cuenta los criterios definidos en el capítulo 3 de este documento, y en especial, aquellos que varían de acuerdo a la tecnología seleccionada. Con este objetivo, la Tabla 4-1, resume la conveniencia de cada una de las tecnologías para cada criterio en particular.

TABLA 4-1. EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

CRITERIO A EVALUAR		802.15.4	802.11x	802.16
CRITERIOS DE NEGOCIO	Visión general del Mercado	No se recomienda porque sus aplicaciones se dirigen hacia los sistemas de automatización de la industria y el hogar	Se recomienda porque posee gran variedad de aplicaciones para la transmisión de voz y datos	Se recomienda parcialmente porque a pesar de que permite implementar aplicaciones de voz y datos, su presencia en el mercado todavía es muy limitada
	Implementaciones actuales de las WMNs	No se recomienda porque contiene pocas implementaciones en el campo de las WMNs y todas se orientan al control de señales de sensores. Además, el proceso de estandarización de las WMNs para esta tecnología es lento y sin resultados significativos	Se recomienda porque es la tecnología mejor posicionada en el campo de las WMNs, existen soluciones propietarias implementadas en varias ciudades, implementaciones con <i>software</i> libre y varios grupos de investigación trabajando sobre el tema. El proceso de estandarización es fuerte y constante	No se recomienda porque no existen implementaciones en este campo, y hay muy pocos grupos de investigación trabajando sobre el tema

CRITERIOS TECNOLÓGICOS

Espectro	Se recomienda porque trabaja sobre bandas no licenciadas útiles para un entorno rural	Se recomienda porque trabaja sobre bandas no licenciadas útiles para un entorno rural	Se recomienda porque trabaja sobre bandas no licenciadas útiles para un entorno rural o en bandas licenciadas útiles para un entorno urbano
Canales sin traslape	No se recomienda porque aunque permite un máximo de 16 canales el ancho de banda del canal es de sólo 2 MHz	Se recomienda porque permite la operación sobre 3 canales no interferentes con un ancho de banda de 22 MHz utilizando el estándar 802.11b/g o 12 canales con el estándar 802.11a	Se recomienda porque permite la operación sobre 12 canales no interferentes con un ancho de banda de 10 MHz
Velocidad	No se recomienda porque las velocidades no son adecuadas para la transmisión de datos y VoIP	Se recomienda porque las velocidades que maneja son adecuadas para el transporte de datos y VoIP	Se recomienda porque las velocidades que maneja son adecuadas para el transporte de datos y VoIP
Cantidad de interfaces	No se recomienda porque las implementaciones actuales operan con una sola interfaz de radio	Se recomienda porque las implementaciones actuales operan hasta con 3 interfaces de radio diferentes	No se recomienda porque no existen implementaciones de WMNs con múltiples interfaces en el mercado
Cobertura alcanzada	No se recomienda porque la distancia entre los nodos es muy pequeña para aplicarse en un entorno rural	Se recomienda porque existen equipos en el mercado que permite alcanzar grandes distancias	Se recomienda porque permite alcanzar grandes distancias
Soporte de calidad de servicio	No se recomienda porque no tiene soporte para QoS	Se recomienda porque permite implementar QoS en distintos niveles	No se recomienda porque el soporte para QoS implementado en el estándar tiene problemas para el tratamiento de aplicaciones de tiempo real sobre las WMNs
Seguridad	No se recomienda porque no implementa sistemas de seguridad robustos	Se recomienda porque implementa sistemas de seguridad robustos y avanzados	Se recomienda porque implementa sistemas de seguridad robustos y avanzados
Manejo de conservación de energía	Se recomienda porque implementa sistemas de conservación de energía	Se recomienda porque implementa sistemas de conservación de energía	No se recomienda porque no implementa sistemas de conservación de energía

CRITERIOS DE DISEÑO	Selección de equipos	Se recomienda porque esta tecnología presenta grandes ventajas en cuanto al costo y disponibilidad de los equipos	Se recomienda porque esta tecnología presenta grandes ventajas en cuanto al costo y disponibilidad de los equipos	No se recomienda porque esta tecnología no tiene gran incidencia en el mercado y por lo tanto el costo de los equipos es bastante elevado y su disponibilidad en el mercado colombiano es escasa
----------------------------	-----------------------------	---	---	--

Partiendo del anterior análisis se puede concluir que la tecnología IEEE 802.11x proporciona una mejor solución de interconexión inalámbrica para la red de EHAS-Silvia, razón por la cual se tomará como base para el posterior diseño y simulación de la red.

4.2 SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO

Para seleccionar el protocolo de enrutamiento más adecuado, se tuvieron en cuenta los criterios definidos en la sección 3.3.3.2 de este documento. Con respecto a estos criterios se observa que el protocolo a seleccionar debe ser un protocolo para redes inalámbricas en malla fijas, pues la movilidad de la red a implementar en este proyecto es nula.

Por consiguiente, analizando las características de los protocolos estudiados en la sección 1.8.3 del capítulo 1, se concluyó que el protocolo más adecuado para los nodos de la malla es STP, debido a que este es un protocolo para redes fijas y de nivel 2, el cual tiene la capacidad de reestablecer las rutas en caso de caída de algún enlace y además concuerda con las bases del nuevo estándar IEEE 802.11s.

El protocolo HWMP también presenta grandes ventajas, sin embargo, por su naturaleza híbrida resulta más conveniente utilizarlo en una red donde la movilidad sea media.

Por último, siguiendo el criterio definido en la sección 3.3.1.4 acerca de la diversidad de antenas, se descarta el uso del protocolo de enrutamiento "inteligente" a nivel MAC para redes inalámbricas en malla, por cuestiones de costos y complejidad de los sistemas adaptativos, además en la actualidad no se dispone del código fuente que implementa este protocolo.

4.3 SELECCIÓN DEL CODEC DE AUDIO PARA LA COMPRESIÓN DE VOZ

De la misma manera, para seleccionar el codec de audio, se analizaron las características de los estándares de comprensión de voz estudiados en la sección 1.9.3, y se concluye que el codec más adecuado para el desarrollo de este proyecto es el G.729, pues este codec presenta una buena relación ancho de banda/calidad.

4.4 INTRODUCCIÓN AL ENTORNO GEOGRÁFICO DEL PROYECTO EHAS – SILVIA

El Enlace Hispanoamericano de Salud (EHAS) surgió como un programa creado por el grupo de bioingeniería y telemedicina de la Universidad Politécnica de Madrid y la asociación madrileña de ingeniería sin fronteras para realizar investigaciones sobre el diseño de sistemas y servicios de comunicación apropiados a las necesidades de los sistemas públicos de asistencia en salud en las zonas rurales de América Latina. Posteriormente se fueron uniendo a estas investigaciones diferentes instituciones y universidades de países como Perú, Colombia, Cuba y Ecuador. En octubre de 2004 EHAS se constituyó como una fundación.

Desde ese momento, el objetivo principal de la fundación es proveer a los agentes prestadores de servicios de salud una serie de herramientas de telecomunicación de bajo costo y un conjunto de servicios de telemedicina adaptados al entorno rural. Con el sistema EHAS se puede dotar a puestos y centros de salud rurales de comunicación de voz y correo electrónico, incluso en zonas donde no haya

teléfono ni fluido eléctrico. También se ofrecen módulos para la capacitación a distancia del personal de salud, posibilidad de consultas remotas a especialistas, ayuda en el acceso a documentación sobre salud y asesoramiento para desarrollar sistemas informatizados de vigilancia epidemiológica [81].

En concordancia con los objetivos de la fundación EHAS, la Universidad del Cauca creó el subprograma EHAS-Colombia con el fin de mejorar los niveles de calidad del sistema público de asistencia sanitaria en las zonas rurales de Colombia.

En su primera fase, EHAS-Colombia desarrolló una experiencia piloto de telemedicina rural en el municipio de Silvia para mejorar la eficiencia del sistema de salud de la zona. Con el propósito principal de utilizar una tecnología apropiada y de bajo costo, se adoptaron soluciones de redes mixtas de voz y datos sobre sistemas inalámbricos de Frecuencias Muy Altas (*Very High Frequency*, VHF) y Wi-Fi, y se instalaron servicios de acceso e intercambio de información tales como un sistema de vigilancia epidemiológica informatizado, formación a distancia, referencia y contrarreferencia de pacientes y teleconsulta. Esto permitió poner a disposición de los actuales responsables de la salud rural una herramienta para la recolección, análisis y realimentación de la información, que mejora la coordinación, evita la sensación de aislamiento social y profesional del personal de salud rural, y mantiene un sistema de formación continua de los trabajadores rurales a un costo razonable [82].

El sistema implementado proporcionó grandes resultados que permitieron extender sus servicios a otros municipios y crear otras redes dentro de la zona como por ejemplo la red de EHAS-Guambía y EHAS-Jambaló. Actualmente se acaba de instalar la red EHAS-Pacífico que comprende la interconexión de los municipios de Guapi, Timbiquí y López de Micay, en el momento esta red se encuentra en su fase de prueba.

Con el desarrollo de este trabajo de grado se generará otra propuesta de interconexión para una de las microredes del proyecto EHAS-Silvia basándose en el funcionamiento de una red inalámbrica en malla. En primer lugar, el reemplazo de la tecnología de VHF por Wi-Fi para la interconexión de los puestos de salud, incrementará el ancho de banda y por lo tanto la cantidad y eficiencia de los servicios suministrados; la introducción de la topología de malla habilitará nuevos caminos para la conexión de puntos distantes y gracias a las propiedades de enrutamiento, será posible utilizar rutas alternas para la comunicación de dos nodos, en caso de que la ruta principal falle, lo cual da una mayor solidez y seguridad al sistema. Por otra parte, se mejorarán las condiciones de disponibilidad y facilidad de mantenimiento de la red, pues la caída de un nodo o el mantenimiento del mismo no implica la suspensión total del servicio en todos los puntos, ya que la información se enrutará automáticamente (sin necesidad de intervención humana) hacia otros nodos de soporte cercanos; caso contrario a lo que sucede actualmente en la red, que como se verá a continuación, presenta una topología que contiene un nodo principal del cual depende la conexión de todos los establecimientos de salud de Silvia y si éste llega a fallar toda la red pierde la conexión.

En la sección 4.4.1 se presenta una descripción general de la configuración actual de la red EHAS-Silvia, las tecnologías utilizadas y el entorno geográfico que comprende esta zona y a partir de este esquema se procederá a realizar el nuevo diseño de la red inalámbrica en malla.

4.4.1 Red EHAS – Silvia

De forma genérica, los sistemas de salud pública de los entornos rurales contienen dos tipos de establecimientos que mantienen comunicación constante entre sí:

- Los puestos de salud son los establecimientos de menor jerarquía dentro del sistema público de atención primaria y constituyen la puerta de acceso al sistema de salud para la población rural. Suelen situarse en poblaciones de no más de mil habitantes tales como veredas y corregimientos, sin líneas telefónicas y mal dotadas de infraestructura de carreteras. Varios puestos de salud dependen de un único centro de salud, conformando lo que se denomina "microred de salud", la unidad básica de atención primaria. Las microredes contienen un médico que es el responsable del centro de salud y que coordina las acciones de los puestos de salud que dependen de él. La mayoría de estos puestos de salud se dirigen por técnicos de enfermería, enfermeras o a lo sumo un médico recién graduado, personal con escasa formación y que necesita comunicación con su médico de referencia para realizar consultas, enviar informes de vigilancia epidemiológica, abastecerse de medicamentos e informar sobre la existencia de brotes epidémicos agudos,

emergencias médicas o desastres naturales. Normalmente, la comunicación e intercambio de información se realiza por desplazamiento del personal de salud entre establecimientos, caminando o en vehículo terrestre o fluvial, lo que puede llevar horas e incluso días.

- Los centros de salud son establecimientos de mayor jerarquía que los puestos de salud, situados en las cabeceras municipales, donde suele llegar la línea telefónica. Un centro de salud es centro de referencia de varios puestos de salud, que se dirige por médicos y posee cierta infraestructura y equipamiento para realizar algunas pruebas diagnósticas, además de permitir en algunos casos hospitalización. Son el lugar desde el cual se coordinan las actividades de los puestos de salud asociados.

Siguiendo el anterior esquema, el sistema público de salud del municipio de Silvia se compone por dos hospitales (centros de salud) que prestan atención a la población del municipio: el Hospital San Carlos situado en la cabecera municipal, dependiente de la Dirección Departamental de Salud del Cauca que sirve como centro de referencia para 8 puestos de salud: Usenda, Pitayó, Quizgó, Miraflores, Tumburao, Quichaya, Valle Nuevo y Santa Lucía; y el Hospital Mamá Dominga ubicado en el Resguardo Indígena de Guambía, que se administra directamente por la comunidad y es centro de referencia de 6 puestos de salud: El Cacique, La Campana, Santa Clara, El Trébol, Agua Bonita y El Cofre. Debido a esta distribución administrativa, la red de EHAS-Silvia creó dos microredes independientes constituidas por el hospital principal (San Carlos o Mamá Dominga) y los puestos de salud dependientes de él, tal como se observa en la Figura 4-1 [82].

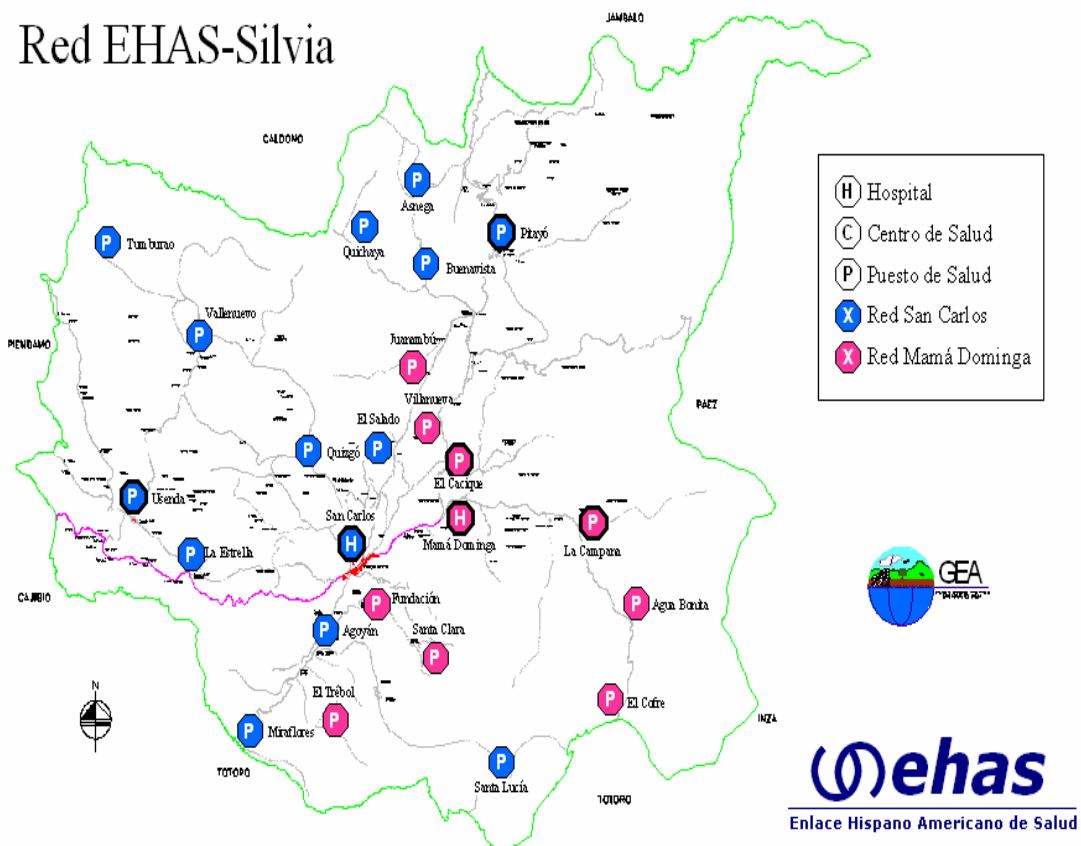


Figura 4-1. Mapa de los establecimientos de salud en el municipio de Silvia

La Figura 4-2 [82] presenta la configuración de la red de datos implementada. En la red local de la Universidad del Cauca se encuentran el Laboratorio de Comunicaciones de Bajo Costo (LCBC), el Centro Coordinador Nacional (CCN) y clientes a través de los cuales el personal médico o técnico del proyecto realiza sus diversas funciones. Esta red local dispone de un enrutador para Internet, que permite el intercambio de información entre sus equipos, y por ende los de la red EHAS, con clientes y servidores conectados a Internet. En el LCBC existe un punto de acceso que se conecta a la red local

de la Universidad del Cauca y es la puerta de entrada de la red EHAS. En el otro extremo de la conexión al punto de acceso se encuentra el repetidor del Cerro Guambía; este repetidor se constituye por un puente *Wi-Fi-Ethernet*, del lado de la red de la Universidad del Cauca, y un punto de acceso, del lado de la red local inalámbrica EHAS-Silvia, formando una red troncal de alta velocidad (2 Mbps).

Al punto de acceso en el repetidor se conectan los equipos que integran la red EHAS-Silvia, que son básicamente los servidores de comunicaciones de las dos microredes; sin embargo, se pueden conectar también clientes WLAN, como sería el caso de la emisora de Guambía. El servidor de comunicaciones de cada microred o centro de salud maneja a su vez dos redes: una red local con clientes LAN en el propio establecimiento de salud, y la red con clientes VHF (con una velocidad de 9600 bps) en los puestos de salud que dependen de él, basada en enlaces de datos AX.25 establecidos sobre conexiones de radio VHF. Para la configuración de la red TCP/IP, se asignaron por parte de la Universidad del Cauca, direcciones de Intranet clase C.

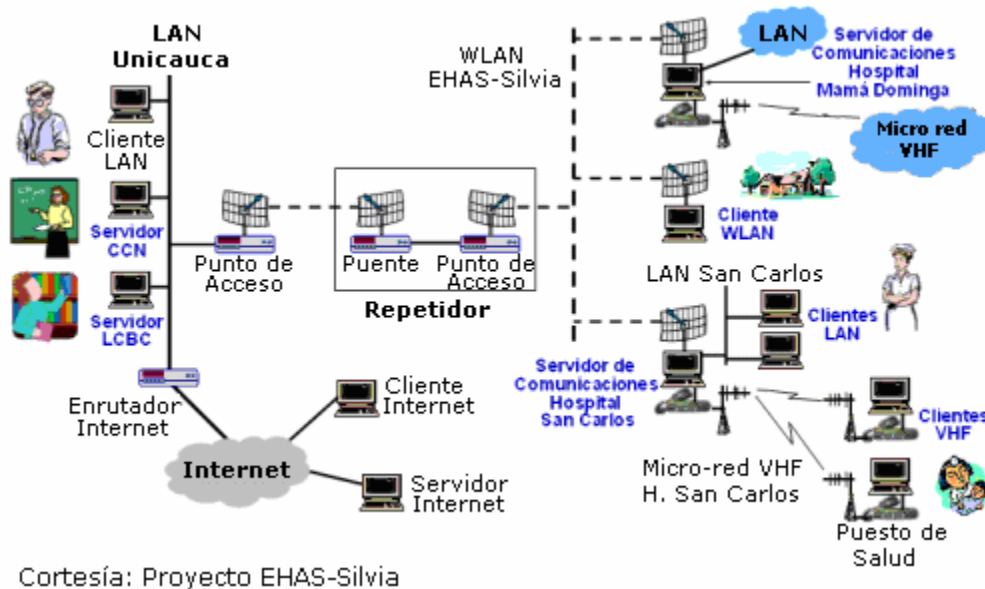


Figura 4-2. Topología mixta Wi-Fi – VHF de la red EHAS-Silvia

En los hospitales y centros de salud se instaló un servidor de comunicaciones que consiste en un computador personal equipado con una tarjeta WLAN Avaya de 11 Mbps para el enlace Wi-Fi, radiomódem y radio VHF para los enlaces con los puestos de salud, y una tarjeta de red para la conexión con la intranet del establecimiento. El servidor tiene instalado Linux Debian Woody habilitado para AX.25 y Wi-Fi, Sendmail para la gestión del correo electrónico, y el servidor de Nombres de Dominio para Internet de la Universidad de Berkeley (*Berkeley Internet Name Domain*, BIND). Además, cada establecimiento tiene un computador cliente en su intranet, configurado con Linux Debian, KDE, OpenOffice y Mozilla.

Cada puesto de salud cuenta con un computador personal, una impresora de matriz de puntos, un radiomódem Tigertronics BP96-A y un radio de VHF Motorola PRO3100. En los computadores se instaló Linux Debian Woody, el entorno gráfico KDE 3.1.4, las utilidades de OpenOffice 1.1.0, el navegador Mozilla 1.0, y AX.25 Proxy para la transmisión de datos por radio.

En la Figura 4-3 [82] se puede apreciar los enlaces que finalmente se eligieron por el proyecto EHAS para el diseño de la red actual.

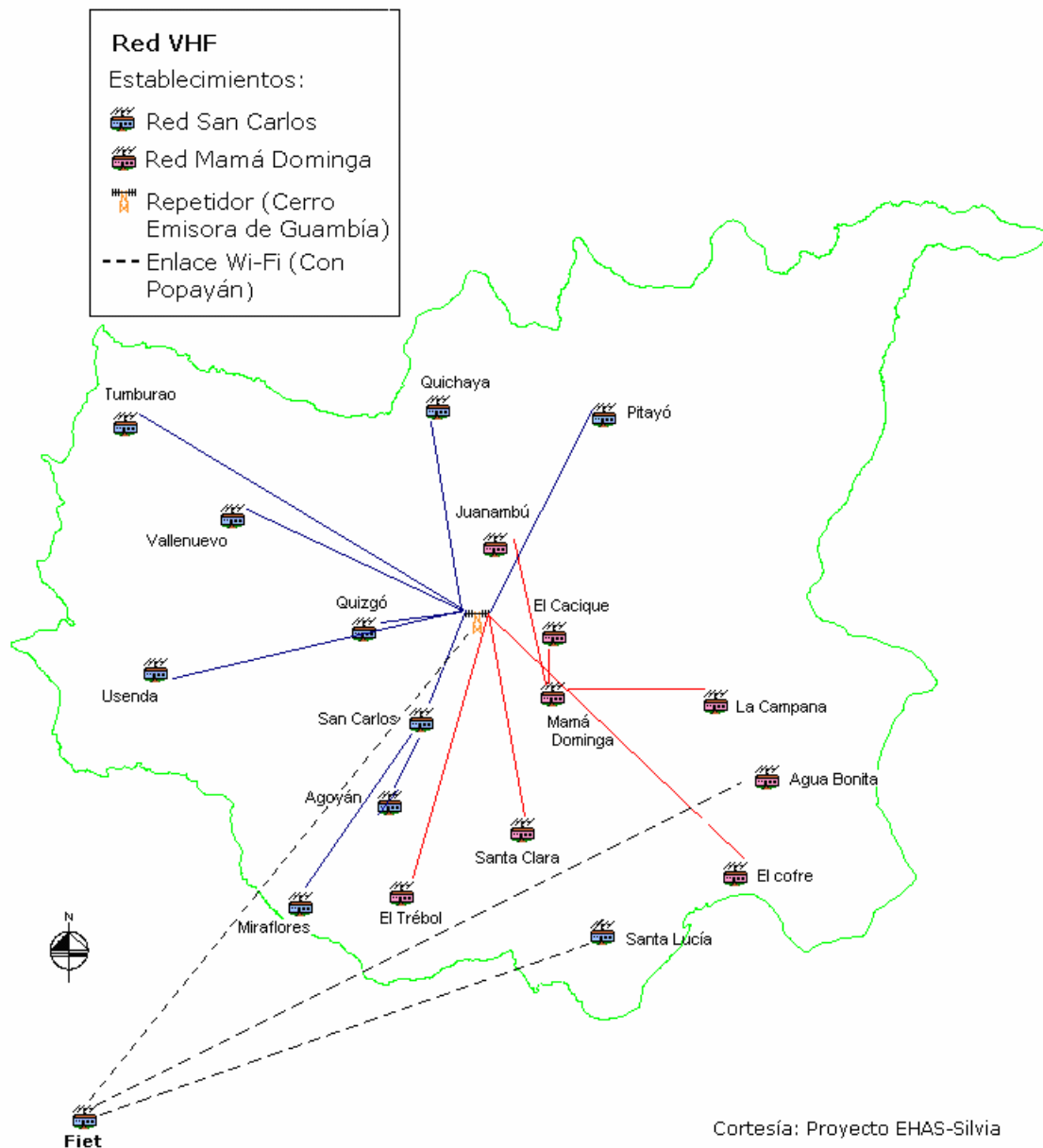


Figura 4-3. Microredes VHF EHAS-Silvia

Dado que el propósito de este proyecto es estudiar la conveniencia de la tecnología de las redes inalámbricas en malla para el transporte de voz en un entorno rural, los autores consideran suficiente tomar una de las microredes que constituyen la red de EHAS-Silvia (microred de San Carlos) para formular el diseño de la nueva red, pues realizar el diseño y simulación para todas las microredes se convierte en un proceso repetitivo y requiere de mayor tiempo para su consecución, por esta razón se propone realizar un modelo de red para una de las microredes teniendo en cuenta que éste debe poder aplicarse a las otras redes sin mayor dificultad. Además, se aclara que con el diseño y simulación de una sola de las microredes se alcanzan los objetivos planteados para este proyecto.

Para la microred escogida se aplicarán todos los pasos de la ingeniería de radioenlace con el fin conseguir un diseño final que se ajuste a los requisitos del proyecto. Seguidamente, se procederá a evaluar el diseño obtenido sobre una herramienta de simulación que permita concluir si la tecnología de las WMNs es adecuada para el transporte de voz en este entorno.

4.5 CONFIGURACIÓN DEL ENLACE

4.5.1 Definición de la Topología del Sistema

El objetivo de este diseño es aplicar una topología de malla inalámbrica a la microred de San Carlos, que como puede observarse en la Figura 4-3 actualmente utiliza un enlace Wi-Fi punto a punto para la conexión de la Universidad del Cauca con la red EHAS-Silvia y dos enlaces VHF punto a multipunto para distribuir los datos en cada una de las microredes.

El nuevo diseño de la red inalámbrica en malla propuesto para la microred de San Carlos, estará compuesto por el LCBC ubicado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cauca, el Hospital de San Carlos, los 8 puestos de salud de la zona y algunos nodos de soporte que aseguran la redundancia de la red.

Cabe notar, que la diferencia entre la red actual y el diseño propuesto se encuentra en el reemplazo de la conexión de VHF por Wi-Fi, la disminución del tamaño de los saltos para mejorar la calidad de los enlaces, la redundancia de caminos para comunicar los distintos puestos de salud y el mejoramiento en la disponibilidad del sistema debido a la reducción del tiempo de reestablecimiento de una comunicación ante la caída de un nodo, condición que puede ser muy conveniente en situaciones de emergencias. Adicionalmente, algunos puestos de salud tendrán la posibilidad de comunicarse directamente con otros puestos de salud sin necesidad de pasar necesariamente por el hospital que los dirige, lo cual permite introducir nuevos servicios y funcionalidades a la red.

A continuación se realiza cada uno de los procedimientos necesarios para conseguir el diseño final de la red.

4.5.2 Determinación del Perfil del Trayecto

4.5.2.1 Ubicación de los puntos a interconectar

Los establecimientos que deben interconectarse son los mismos que actualmente enlaza la microred de San Carlos, sin embargo, por las condiciones topográficas de la zona no todos los puntos tienen línea de vista directa entre sí, por lo cual será necesario instalar algunos puntos intermedios que sirvan de puente para comunicar dos puntos distantes y de esta manera lograr implementar una topología de malla que le agregará la redundancia a cada nodo para que tenga más de una opción para transmitir su información. A continuación se detallará cada uno de los establecimientos que deben interconectarse y posteriormente se describirán los puntos intermedios de acuerdo al estudio que arroje la fase del levantamiento del sitio.

- **Laboratorio de Comunicaciones de Bajo Costo (LCBC):** Es el lugar desde el cual se establece la conexión entre los hospitales y la red de datos de la Universidad del Cauca quien es el proveedor de Internet para toda la red. En este punto también se encuentra el CCN desde el cual se desarrollan y proveen los servicios de capacitación y acceso a información para el personal sanitario. El LCBC está ubicado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) y los equipos de interconexión pueden instalarse sobre la terraza más alta que contiene el edificio, punto sobre el cual se encuentra una torre de 5 metros de altura. La Tabla 4-2 indica los datos de localización geográfica y otros asociados al mismo.

TABLA 4-2. DATOS GEOREFERENCIADOS DEL LCBC

LCBC	
Latitud	2°26'48" N
Longitud	76°35'55" O
Altitud	1.744 m
Distancia desde la torre hasta el punto de red	25 m
Altura de la torre	20 m

Cortesía: Proyecto EHAS-Silvia

- **Cerro el Tranal:** En la red actual EHAS-Silvia el punto repetidor que conecta esta red con la Universidad del Cauca está instalado en el cerro Nueva Guambía, sin embargo, los directores del proyecto EHAS-Silvia han manifestado sus intenciones de trasladar la infraestructura existente en este punto hacia el cerro El Tranal considerando que este último presenta condiciones más favorables para ampliar la cobertura del proyecto a poblaciones nuevas no atendidas actualmente en la región. Teniendo en cuenta este criterio, el cerro el Tranal se tomará como punto principal de interconexión entre las redes de Unicauca y Silvia, sin descartar la posibilidad de ubicar otros puntos de interconexión de estas dos redes después de realizar la fase del levantamiento del sitio, con el fin de proporcionar redundancia a este enlace principal.

Como se muestra en la Figura 4-4, el cerro el Tranal tiene línea de vista directa con Popayán, Silvia y el actual repetidor de red EHAS, además, el lugar escogido para la instalación de la infraestructura cuenta con una carretera hasta cierto punto del cerro, y su posterior ascenso no representa mayor dificultad. Cerca del sitio pasan algunas líneas de energía, las cuales podrían prestar su servicio eléctrico para la alimentación de los equipos en la estación base. En la Tabla 4-3 se consignan los datos georeferenciados del lugar.

TABLA 4-3. DATOS GEOREFERENCIADOS DEL REPETIDOR DEL CERRO EL TRANAL

Cerro el Tranal	
Latitud	2°39'06" N
Longitud	76°21'19" O
Altitud	3.175 m
Distancia desde la torre hasta el punto de red	25 m
Altura de la torre	20 m

Cortesía: Proyecto EHAS-Silvia



a) Vista desde el cerro el Tranal hacia Popayán



b) Vista desde el cerro el Tranal hacia Silvia



c) Vista desde el cerro el Tranal hacia la repetidora de EHAS

Cortesía: Proyecto EHAS-Silvia

Figura 4-4. LOS del cerro el Tranal con diferentes puntos de interés

- **Hospital San Carlos:** El Hospital San Carlos está ubicado en la cabecera municipal de Silvia. El establecimiento cuenta con los servicios básicos de agua y energía y contiene un mástil de aproximadamente 2 metros que actualmente se conecta con el cerro Nueva Guambía, pero que también cuenta con línea de vista con el cerro el Tranal. Los datos georeferenciados de este establecimiento se resumen en la Tabla 4-4.

TABLA 4-4. DATOS GEOREFERENCIADOS DEL HOSPITAL SAN CARLOS

Hospital San Carlos	
Latitud	2°36'50" N
Longitud	76°23'10" O
Altitud	2.538 m
Distancia desde la torre hasta el punto de red	25 m
Altura de la torre	10 m

Cortesía: Proyecto EHAS-Silvia

- **Microrred de San Carlos:** El Hospital San Carlos sirve como referencia para consulta y administración de 8 puestos de salud que se ubican en la zona aledaña. Todos los puestos de salud cuentan con un mástil sobre el cual se instalaron los equipos VHF para la comunicación con el centro de salud, por lo tanto, esta infraestructura puede soportar los nuevos equipos Wi-Fi. Los datos georeferenciados de cada puesto de salud perteneciente a esta microrred se detallan en la Tabla 4-5.

TABLA 4-5. DATOS GEOREFERENCIADOS DE LOS PUESTOS DE SALUD DEPENDIENTES DEL HOSPITAL SAN CARLOS

Puesto de salud	Latitud	Longitud	Altura de la torre
Usenda	76°28'14.22" N	2°37'45.00" O	10 m
Pitayó	76°19'39.78" N	2°42'55.62" O	10 m
Tumburao	76°29'00.60" N	2°42'46.20" O	10 m
Valle Nuevo	76°26'33.60" N	2°40'41.70" O	10 m
Quichaya	76°23'04.73" N	2°43'10.15" O	10 m
Quizgó	76°24'20.64" N	2°38'02.58" O	10 m
Santa Lucía	76°17'42.90" N	2°33'07.62" O	10 m
Miraflores	76°25'33.42" N	2°33'16.38" O	10 m

Cortesía: Proyecto EHAS-Silvia

4.6 LEVANTAMIENTO DEL SITIO

Esta fase es muy importante porque permite determinar la presencia de obstáculos en la trayectoria de la señal, con ello se prevé la liberación de la zona Fresnel, el número de saltos y la implementación de repetidores, el tipo de superficie sobre la cual se ha de propagar la señal y con ello determinar el margen de desvanecimiento para asegurar un desempeño adecuado. A continuación se realiza un estudio detallado de cada punto a interconectar.

4.6.1 Determinación de LOS y Cálculos de Fresnel

Para ubicar los sitios de interconexión, obtener las distancias entre cada uno de los puntos, determinar la condición de LOS entre ellos, y realizar las demás actividades de esta fase, se siguieron las recomendaciones realizadas en la sección 3.4.2 sobre los métodos disponibles para el levantamiento del sitio y se tuvo en cuenta las experiencias que el grupo EHAS-Silvia tiene en este campo. De esta manera, se pudo observar que para este proyecto en particular, el uso de mapas cartográficos del IGAC no resulta conveniente pues el tipo de topología escogida y el número de puntos a interconectar dificulta los cálculos manuales para la determinación de LOS y presencia de interferencias. En contraste, las herramientas *software*, facilitan el cálculo de los enlaces a partir de la configuración de

los parámetros técnicos de cada equipo y la información proporcionada por los mapas cartográficos de las obstrucciones presentes en el entorno. El grupo EHAS por su parte, manifestó que en principio utilizó mapas cartográficos debido a la exactitud de su información pero después de realizar algunas comparaciones llegó a la conclusión de que los mapas digitales han evolucionado y ahora tienen una aproximación aceptable con la realidad [25], razón por la cual, en el momento hacen uso de herramientas *software* para el diseño de sus redes.

En consecuencia, para el levantamiento del sitio de este diseño, se decidió utilizar la herramienta *software* de libre distribución llamada Radio Mobile [83] que permite simular las condiciones de un enlace inalámbrico mediante el manejo de los parámetros más sobresalientes de éste.

La herramienta escogida incluye la ayuda de cartografía digital que permite establecer el relieve y las condiciones del radio enlace más cercanos a la realidad, lo cual se presenta a través de una interfaz gráfica; su manejo implica descargar un mapa digital de la región o área en estudio, así como ingresar las posiciones de los puntos que se desean ubicar y algunas especificaciones típicas de los equipos (como potencia del transmisor, pérdidas de línea, ganancia de las antenas, sensibilidad del receptor y altura de las antenas) que se aspiran utilizar. Después de configurar todos estos parámetros es posible revisar algunas condiciones que se presentan en cada uno de los enlaces como LOS, presencia de obstáculos, distancia entre los puntos, cálculo de interferencias, pérdidas de propagación, entre otras.

Para la ubicación de los puntos de este diseño se utilizaron los datos geográficos que se presentaron en la sección 4.5.2.1, cada uno de ellos se ubicó en un mapa digital proporcionado por el grupo EHAS-Silvia utilizando la herramienta Radio Mobile. A partir de una de las funcionalidades de esta herramienta que muestra la calidad de señal entre dos puntos, fue posible observar que no todos los puntos presentaban LOS y como se precisó en la sección 3.4.1 de este capítulo, esta condición es obligatoria para un enlace inalámbrico Wi-Fi, razón por la cual fue necesario ubicar puntos intermedios para lograr la conexión.

Debido a la imposibilidad de realizar una visita a cada uno de los puntos para corroborar sus condiciones y ubicar nuevos puntos intermedios (que en este proyecto se denominarán Nodos de Soporte), se decidió utilizar otra de las funcionalidades de la herramienta denominada "zonas de probabilidad de cobertura" que permite observar la zona de visibilidad para un punto en particular o la zona de cobertura radio eléctrica para la frecuencia y sistemas estudiados. Siguiendo este procedimiento, se dibujaron las zonas de visibilidad para aquellos puntos que no tenían LOS entre sí y las áreas comunes entre ellos se tomaron como referencia para la ubicación de los nodos de soporte. Otro criterio que se tuvo en cuenta para la ubicación de estos nodos, fue la distribución de tráfico en la red, que se presenta con mayor frecuencia desde cada uno de los puestos de salud hacia el hospital que lo administra, por esta razón, se ubicaron los nodos de soporte tratando de que cada puesto de salud tuviera al menos dos caminos diferentes para conectarse a su centro de salud, adicionalmente, algunos puestos de salud tienen conexión directa con otros puestos de salud lo cual crea un nuevo camino de comunicación que no existía en la red anterior y puede ser provechoso para crear nuevos servicios o en casos de emergencias para comunicarse con el puesto de salud más cercano.

La Figura 4-5 muestra los establecimientos, enlaces y nodos de soporte utilizados para interconectar los puntos de la microrred de San Carlos. En esta figura, las líneas de color verde, representan un enlace inalámbrico con LOS entre los dos puntos con una señal de +3 dB, lo cual se considera como adecuado para el desempeño del sistema.

Dado que la red se diseñó para que todos los puestos de salud tuvieran al menos dos enlaces con el centro de salud, con condición de LOS, bien sea conectados directamente o por medio de nodos de soporte, no se considera necesario realizar los cálculos de Fresnel manualmente, en lugar de esto, en el Anexo E se muestran los resultados de los análisis de los trayectos de propagación entre cada nodo, realizados con la herramienta Radio Mobile, que permiten observar que cada enlace cuenta con la suficiente intensidad de señal para establecer la comunicación entre los puntos. Adicionalmente, se presentan las plantillas de levantamiento del sitio para cada uno de los enlaces.

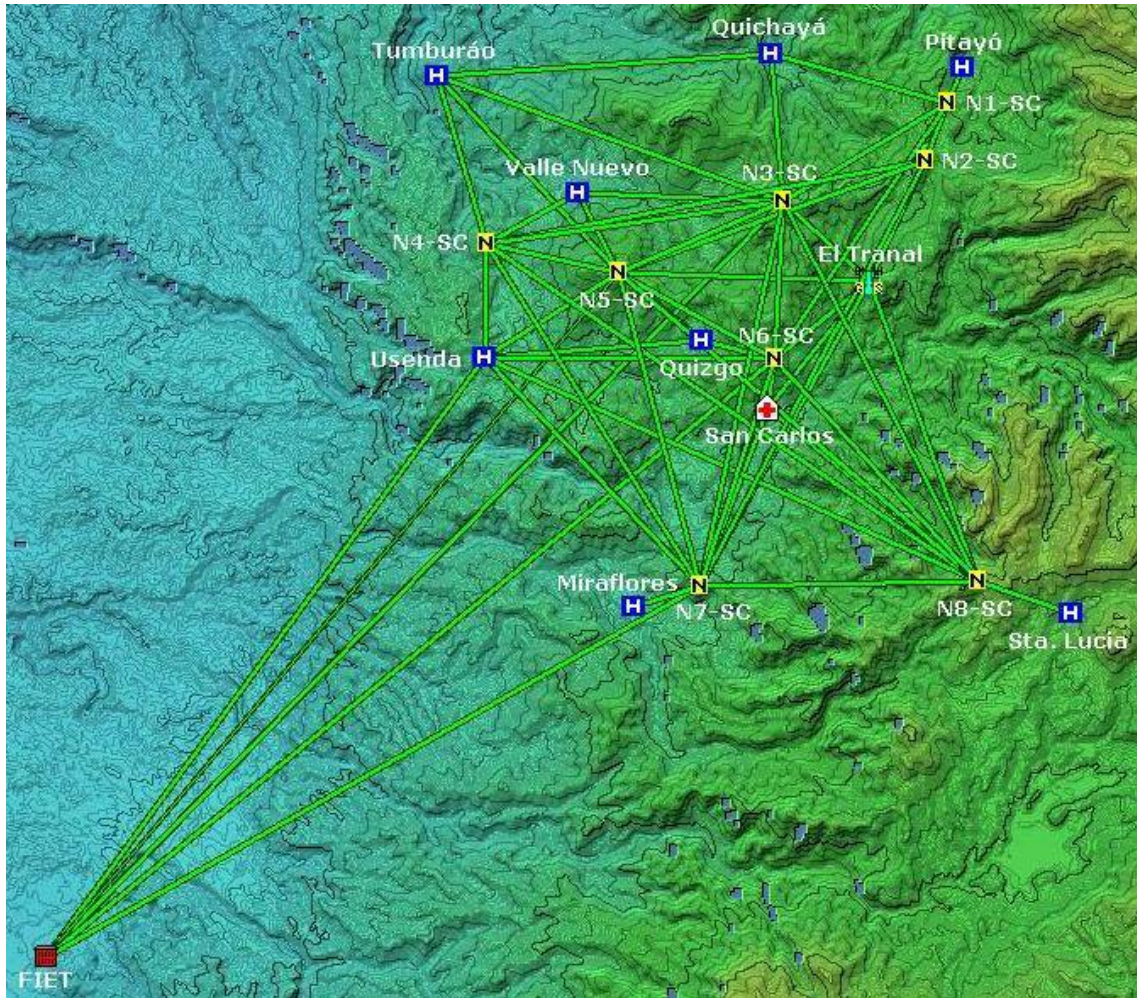


Figura 4-5. Interconexión FIET-Microred San Carlos

4.6.2 Análisis de RF

Como se recomendó en la sección 3.4.1, además de verificar condiciones de LOS y conectividad en cada uno de los enlaces, es necesario revisar los niveles de interferencia presentes en cada uno de los puntos para determinar la degradación en la calidad del servicio suministrado por parte de los equipos de radiocomunicaciones, esto debido a que la tecnología seleccionada trabaja en una banda de frecuencias de uso común que no requiere licencia para operar en ella, y por lo tanto, no se puede reclamar protección para evitar la interferencia causada por otras redes Wi-Fi cercanas, teléfonos móviles, transmisiones inalámbricas *Bluetooth*, sistemas de microondas o, incluso, luces fluorescentes.

Este análisis debe realizarse sobre cada uno de los puntos ya instalado utilizando analizadores de espectro, *software* especializado funcionando sobre los equipos de radio y otros instrumentos de precisión capaces de sintonizar las bandas de frecuencia y de detectar actividades en bandas cercanas que puedan afectar las transmisiones en las bandas elegidas. Debido a que dentro de los objetivos de este proyecto no se encuentra la instalación de la red no es posible llevar a cabo dichos procedimientos, sin embargo, puede señalarse que gracias a que esta solución se enfoca hacia entornos rurales aislados en donde el medio no se encuentra saturado de otras soluciones inalámbricas que puedan catalogarse como fuentes de interferencia probables y que la tecnología cuenta con técnicas para el tratamiento de la interferencia, como DFS, utilización de canales sin traslape y técnicas de reutilización de frecuencia, es muy probable que el sistema no tenga mayores problemas con la interferencia y todos sus puntos operen de manera adecuada.

4.6.3 Presupuesto del Enlace

Como actividad final de esta fase del diseño, y con el objetivo de asegurar la confiabilidad de los enlaces y garantizar el porcentaje de disponibilidad del sistema requerido, es necesario calcular el margen operativo del sistema o margen de desvanecimiento, que como se explicó en la sección 3.4.2 es la diferencia entre el nivel de potencia en recepción y la sensibilidad mínima requerida en el equipo receptor para obtener una transmisión con menor probabilidad de errores. Para este diseño se asegurará que cada uno de sus enlaces tenga al menos un SOM de 10 dB con el fin de garantizar un grado de disponibilidad superior al 90%.

El cálculo del nivel de potencia en recepción de cada uno de los extremos de interconexión, puede calcularse a partir de parámetros como la potencia de transmisión, las ganancias de las antenas, pérdidas internas del sistema, pérdidas inducidas en cables y conectores y pérdidas de espacio libre. Y viene dado por la siguiente fórmula:

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_{Tx} - L_{CTx} + G_{Tx} - L_{fs} + G_{Rx} - L_{Rx} - L_{CRx}$$

Donde:

P_{Rx} : Nivel de señal en recepción, dada en dBm
 P_{Tx} : Potencia a la salida del transmisor, en dBm
 L_{Tx} : Pérdidas en la línea de transmisión, en dB
 L_{Rx} : Pérdidas en la línea de recepción, en dB
 L_{CTx} : Pérdidas por conectores en transmisión, en dB
 L_{CRx} : Pérdidas por conectores en recepción, en dB
 G_{Tx} : Ganancia de la antena en transmisión, en dBi
 G_{Rx} : Ganancia de la antena en recepción, en dBi
 L_{fs} : Pérdidas por espacio libre, en dB

Y,

$$L_{fs} = 32,45 + 20 \cdot \log f + 20 \cdot \log d$$

Donde:

f : Frecuencia de operación, en MHz
 d : Distancia entre puntos, en Km

La sensibilidad mínima requerida en el equipo receptor para obtener una transmisión con menor probabilidad de errores, se expresa siempre en dBm negativos (- dBm) y es el nivel más bajo de señal que la red inalámbrica puede distinguir. Este valor depende de la tasa de transmisión, y como regla general la tasa más baja (1 Mbps) tiene la mayor sensibilidad. Al igual que la potencia de transmisión este dato debe suministrarse por el fabricante del equipo.

Finalmente, el SOM se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$SOM = P_{Rx} - S_{Rx}$$

Donde:

S_{Rx} : Sensibilidad del receptor, en dBm.

Revisando los equipos existentes en el mercado que podrían seleccionarse para la solución final se decide asumir los valores que se muestran en la Tabla 4-6:

TABLA 4-6. VALORES ASUMIDOS PARA LOS CÁLCULOS DEL PRESUPUESTO DEL ENLACE

Parámetro	Nodos de Soporte	Nodos Finales
P_{Tx} [dBm]	30 (1 W)	23 (200 mW)
L_{Tx} [dB] ¹	1	1
L_{Rx} [dB] ¹	1	1

L_{CTx} [dB] ²	0.4	0.4
L_{CRx} [dB] ²	0.4	0.4
G_{Tx} [dBi]	24	24
G_{Rx} [dBi]	24	24
S_{Rx} [dBm] ³	-95	-95

- 1 Según el fabricante las pérdidas en la línea de transmisión son de 0,217 dB/m, sin embargo se asumirán valores máximos de 1dB.
- 2 De acuerdo con las especificaciones del fabricante cada conector introduce pérdidas de 0,2 dB.
- 3 Los valores de sensibilidad de los equipos que se suministran por el fabricante varían entre -96 dB y -93 dB para velocidades de 2 Mbps en la banda de 2.4GHz y -94 dB para tasas de 6 Mbps en la banda de 5.8GHz.

Para el cálculo de los niveles de recepción y SOM en cada punto se decidió hacer uso de la herramienta Radio Mobile la cual permite calcular estos parámetros a partir de la configuración de los datos relacionados en la Tabla 4-6. Los resultados encontrados pueden observarse en el Anexo E en el cual se presentan los enlaces entre los puntos que tienen LOS y los parámetros asociados a dicho enlace, para todos los puntos de la microred de San Carlos. A manera de ejemplo, en la Figura 4-6 se ilustra el enlace existente entre la FIET y el Tranal, donde puede observarse los valores de pérdidas por espacio libre (*PathLoss*), nivel de potencia en recepción (*Rx level*) y SOM (*RX Relative*) asociados al enlace, así como los valores de potencia de transmisión, pérdidas, ganancia de antena, sensibilidad del receptor, frecuencia de operación y altura de antena configurados en cada punto. El resultado de SOM encontrado en este enlace confirma que los valores manejados (de variables del entorno y especificaciones de equipos) reúnen las condiciones necesarias para garantizar la viabilidad del enlace, lo mismo sucede con todos los enlaces ilustrados en el Anexo E, por lo cual puede concluirse que la red en su totalidad cumple con los requisitos mínimos de disponibilidad.

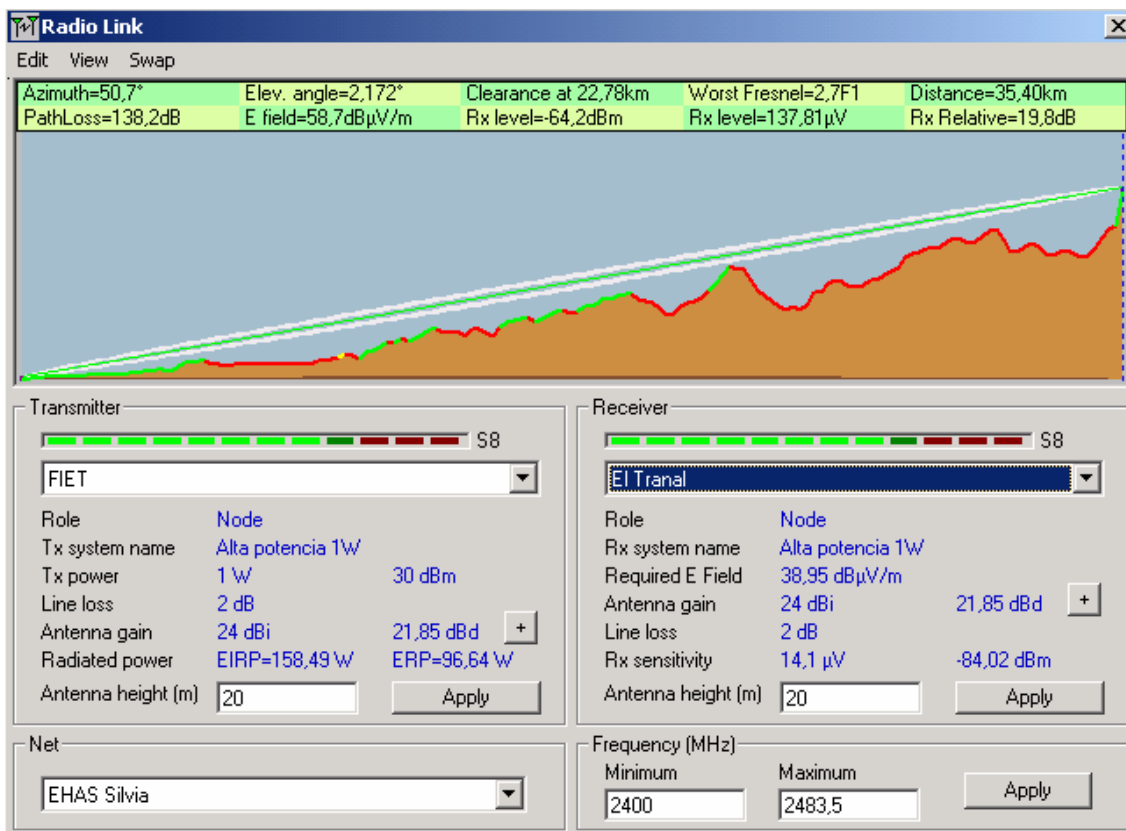


Figura 4-6. Perfil del enlace FIET-Cerro el Tranal según Radio Mobile

4.7 ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN

Después de estudiar las necesidades de cada uno de los sitios de emplazamiento haciendo un análisis exhaustivo de las condiciones físicas y de radio frecuencia que presenta cada punto, es posible definir una arquitectura de la solución final. Para conseguir este objetivo se decidió manejar un esquema de configuración de infraestructura o *backbone* en malla, como el que se describió en la sección 1.3 de este documento, que está compuesto por MAP con *gateways* que son los encargados de conectar la WMN con otras redes LAN y WLAN, MAP cuya función es enrutar la información a través de toda la red y clientes convencionales que se conectan a estos MAP por medio de enlaces *Ethernet* o tarjetas inalámbricas.

Siguiendo este esquema, la WMN de la microred de San Carlos, está compuesta por tres clases de nodos: un nodo pasarela ubicado en el LCBC y compuesto por un MAP con *gateway* y todos los elementos necesarios para conseguir el acceso a Internet y suministrar los servicios a la red, varios nodos de soporte constituidos por MAPs e instalados sobre toda la zona de cobertura del proyecto y varios clientes convencionales denominados nodos cliente que estarán presentes en cada uno de los establecimientos de salud. A continuación, se describirá cada uno de estos nodos especificando los componentes necesarios para su correcta implementación.

4.7.1 Nodo Pasarela

El nodo pasarela se encuentra en la frontera de la WMN con el exterior y se encarga de suministrar la conectividad a Internet de toda la red EHAS-Silvia y por ende, de la comunicación de esta red inalámbrica con otras redes EHAS presentes en el país y en otros países, a través de su conexión cableada hacia Internet. Adicionalmente, sobre este nodo se instalarán todos los servidores para suministrar los servicios de correo, Web, VoIP y gestión de la red.

Este nodo se ubicará en la Universidad del Cauca y estará compuesto de los siguientes elementos:

- Un enrutador para la conexión a Internet del LCBC y la red EHAS-Silvia.
- Servidores de correo, Web, VoIP y herramientas de gestión.
- Un MAP con *gateway*, que servirá como puente de interconexión entre la red EHAS-Silvia y las demás redes conectadas a Internet.

Para la implementación de este y todos los nodos de la red, es necesario contar con ciertos elementos de infraestructura, telecomunicaciones, energía y seguridad; que se mostrarán a continuación, resaltando que debido a que en el momento ya existe una red montada para este proyecto, es posible reutilizar algunos de estos elementos y sólo se tendrá que reemplazar aquellos equipos que implementen la tecnología de las redes en malla.

Para el caso del nodo pasarela, se cuenta con una infraestructura implementada que soporta el nodo actual, constituida por una torre de 5 metros de altura ubicada en la parte más alta del edificio de la FIET sobre la cual puede instalarse la antena que transmitirá las señales del MAP con *gateway*. El edificio cuenta con suministro de energía permanente útil para la alimentación de todos los equipos. Por otro lado, el LCBC cuenta con el enrutador para la conexión con la LAN de la Universidad del Cauca y se encuentran instalados todos los servidores necesarios para soportar los servicios requeridos.

En la Figura 4-7, puede observarse el esquema final de este nodo.

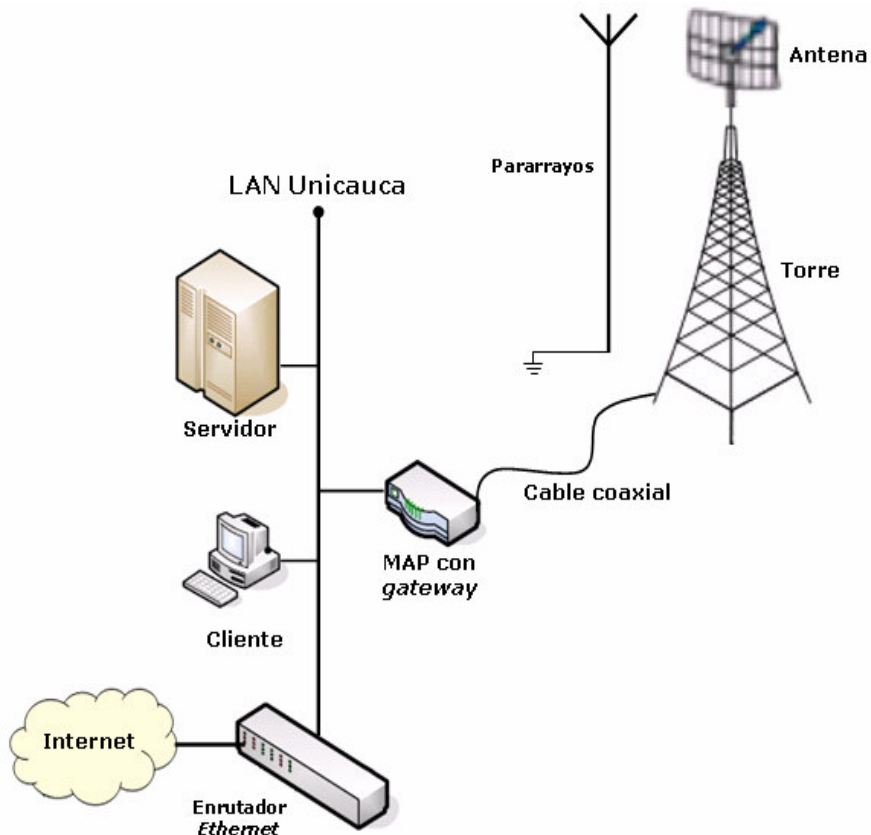


Figura 4-7. Nodo pasarela ubicado en la FIET

4.7.2 Nodos de Soporte

Como se explicó anteriormente, para interconectar algunos de los nodos finales de la red, puestos y centros de salud, fue necesario implementar nodos de soporte cuya función principal es enrutar la información y servir de puente entre dos puntos distantes que no cuentan con línea de vista entre sí. Estos puntos deben situarse en sitios de gran altura tales como edificios, montañas y cerros desde los cuales pueda establecerse un enlace con línea directa hacia los puestos de salud.

En cuanto a su implementación debe notarse que es muy probable que los puntos sobre los cuales se localicen estos nodos carezcan de cualquier infraestructura física sobre la cual montar los equipos, por esta razón será necesario instalar en aquellas localizaciones casetas para guardar algunos elementos eléctricos y de comunicaciones y proteger los equipos de condiciones meteorológicas adversas y robos, torres de aproximadamente 20 metros para el montaje de antenas, pararrayos que protejan los equipos contra los efectos transitorios de los rayos (sobrevoltajes y sobrecorrientes), y por último, paneles solares o sistemas eólicos (dependiendo de las condiciones climáticas de la zona) para suministrar la energía a los equipos en aquellas zonas donde no se cuenta con suministro de electricidad.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, cada nodo de soporte estará compuesto por los elementos que se muestran en la Figura 4-8.

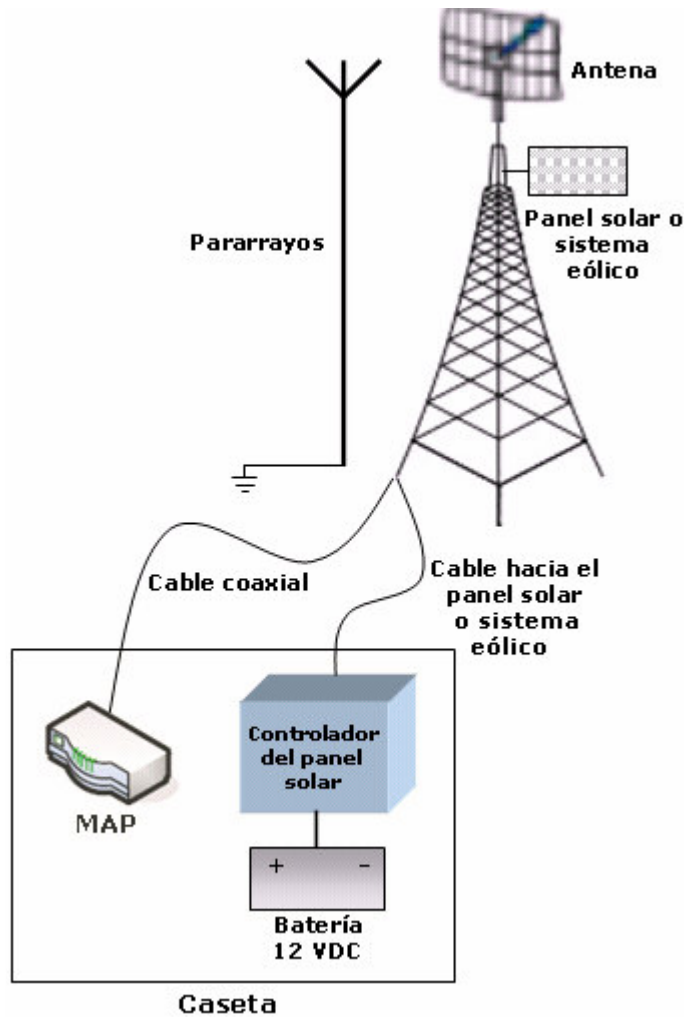


Figura 4-8. Nodo de soporte

4.7.3 Nodos Cliente

Los nodos cliente están presentes en cada uno de los puestos de salud.

La red actual instaló en cada uno de estos puntos mástiles de aproximadamente 5 metros sobre los cuales se encuentran los equipos VHF. A excepción del puesto de salud de Usenda que necesita una torre de aproximadamente 25 metros, los demás puestos de salud pueden seguir utilizando el mástil instalado para colocar las nuevas antenas. Además, no hay necesidad de construir casetas porque los equipos pueden guardarse dentro de cada puesto de salud. Cada puesto de salud cuenta con suministro de fluido eléctrico para alimentar los equipos, sin embargo, se recomienda la instalación de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (*Uninterruptible Power Supply, UPS*) que permita un servicio continuo en caso de cortes en la energía de la zona.

El esquema de los nodos clientes se muestra en la Figura 4-9.

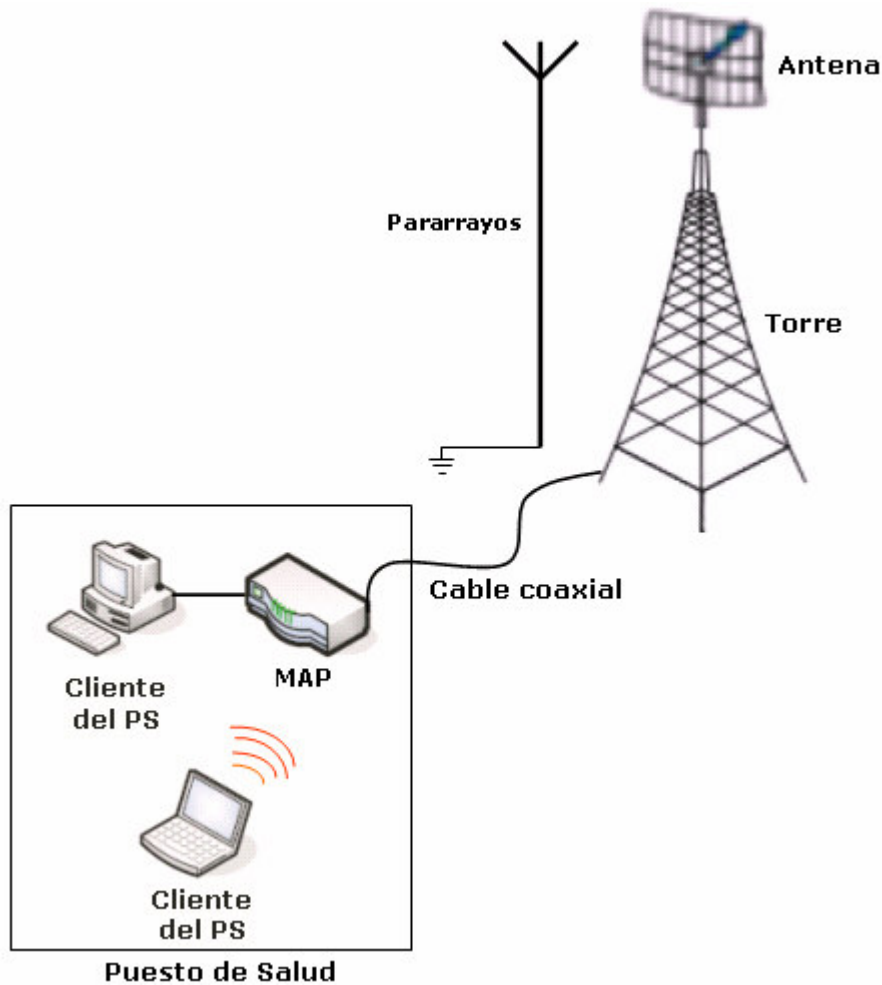


Figura 4-9. Nodo cliente

4.8 SELECCIÓN DE EQUIPOS

La selección de los equipos tendrá en cuenta los criterios definidos en la sección 3.4.3 de este documento, que se establecieron considerando las condiciones de un entorno rural y pueden resumirse en bajo costo, cantidad de interfaces, robustez ante las condiciones meteorológicas adversas, disponibilidad de compra en el mediano y largo plazo, rango de cobertura y desempeño ofrecidos, facilidad de instalación y gestión, portabilidad y compatibilidad con otras redes, consumo reducido de potencia, interoperabilidad de los dispositivos inalámbricos, protección humana, cumplimiento de estándares, capacidad de gestión, servicio post-venta y posible soporte técnico del proveedor.

Como se presentó en las secciones 3.2.2 y 3.3.1.5 existen en el mercado soluciones inalámbricas en malla desarrolladas por grandes empresas como Cisco, Nortel, Motorota, BelAir, entre otras, que implementan sus propias tecnologías y protocolos de enrutamiento, obteniendo grandes resultados que se ven reflejados en las implementaciones de diferentes redes en malla en varias ciudades de los Estados Unidos y otros países en desarrollo. Sin embargo, es necesario notar que todas estas soluciones requieren de grandes inversiones debido a que el costo por unidad de cada uno de los equipos es bastante elevado y es viable sólo en estos casos porque los países cuentan con los recursos económicos suficientes para implementar dichas soluciones. En contraste, los países en vía de desarrollo con capacidades de pago más reducidas deben adoptar soluciones más económicas, generalmente implementadas sobre equipos inalámbricos convencionales que permiten realizar las modificaciones necesarias a sus componentes (por ejemplo, APs con chipset Atheros) para agregar las características de las WMNs.

La Tabla 4-7, contiene una lista de los proveedores de equipos comerciales y no comerciales más representativos en las WMNs.

TABLA 4-7. PRECIO DE ALGUNOS EQUIPOS QUE IMPLEMENTAN LAS PROPIEDADES DE LAS WMNs

Empresa	Producto	Características	Precio (Pesos)
BelAir Networks	BelAir100C	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios • Protocolo de enrutamiento propietario • Soporte para 802.11a/b/g, Pre-WiMAX y WiMAX 	No disponible
	BelAir 200	<ul style="list-style-type: none"> • 4 radios • Protocolo de enrutamiento propietario • Soporte para 802.11a/b/g, Pre-WiMAX y WiMAX • QoS con 4 niveles de priorización, VoIP 	\$ 10 ' 580.000
	BelAir 300	<ul style="list-style-type: none"> • 6 radios • Soporte para 802.11a/b/g, GSM, Pre-WiMAX y WiMAX • Protocolo de enrutamiento propietario 	No disponible
Cisco	Aironet 1500	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios • Soporte para 802.11a/b/g • QoS 802.11e • Protocolo de enrutamiento propietario 	\$ 9 ' 200.000
Firetide	HotPort 3203	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios • Soporte para 802.11a/b/g • QoS 802.1p • Protocolo de enrutamiento propietario 	\$ 4 ' 588.500
Nortel	Wireless AP 7220	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios • Soporte para 802.11b/g • Protocolo de enrutamiento propietario 	\$ 4 ' 556.300
Strix Systems	OWS 3600-20	<ul style="list-style-type: none"> • 4 radios • Soporte para 802.11a/g • Protocolo de enrutamiento propietario 	\$ 11 ' 569.000
	OWS 3600-30	<ul style="list-style-type: none"> • 6 radios • Soporte para 802.11a/g • Protocolo de enrutamiento propietario 	\$ 13 ' 183.600
Tropos Networks	5320 MetroMesh Router	<ul style="list-style-type: none"> • 1 radio • Soporte para 802.11a/b/g • Protocolo de enrutamiento propietario 	\$ 19 ' 550.000
MeshDynamics	MD4458-AABB	<ul style="list-style-type: none"> • 6 radios • Chipset Mini-PCI Atheros (configurable) • QoS con 4 prioridades 802.11e 	\$ 5 ' 520.000
Meshnode	Meshnode	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios 	\$ 1 ' 436.787

		<ul style="list-style-type: none"> • Soporte para 802.11a/b/g • <i>Chipset</i> Mini-PCI Atheros (configurable) • Protocolo de enrutamiento OLSR 	
AirMatrix	WISP-ODMESH-DB-1-2-ABG-400a/100g-DaDg	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios • Soporte para 802.11a/b/g • <i>Firmware</i> de la marca LocustWorld Mesh AP PRO 	\$ 3 ' 245.000
LocustWorld	Meshbox	<ul style="list-style-type: none"> • 1 radio • Soporte para 802.11b • Protocolo de enrutamiento basado en estándares abiertos y distribuido como un proyecto de fuente abierta 	\$ 750.000
Linksys	WAP55AG	<ul style="list-style-type: none"> • 2 radios • Soporte para 802.11a/b/g • <i>Chipset</i> Mini-PCI Atheros (configurable) 	\$ 380.000

Teniendo en cuenta que la solución propuesta en este proyecto debe ser consecuente con los objetivos del proyecto EHAS, el cual plantea implementar tecnologías de bajo costo en países en vía de desarrollo, para solucionar los problemas de comunicación en los establecimientos de salud aislados, es necesario seleccionar aquellos equipos que presenten las mejores capacidades al menor costo posible, por esta razón, se decidió utilizar la solución presentada por la empresa Linksys con su equipo WAP55AG, que aunque en un principio no se diseñó para el despliegue de WMNs, poco a poco ha sido adoptado por muchas comunidades de investigación de las redes en malla, debido a su bajo costo y a la licencia abierta de su *firmware* que permite implementar y probar nuevos protocolos de enrutamiento y modificar ciertos parámetros de la tecnología 802.11x para hacerla apta para alcanzar mayores distancias.

Algunos de los *firmware* implementados para redes inalámbricas en malla que pueden instalarse en este equipo son: OpenWRT, FreifunkFirmware y Pebble.

4.8.1 Estimación de Presupuesto Operativo y de Capital

En las Tablas 4-8, 4-9, 4-10 y 4-11 se presentan las listas de los equipos que se deben instalar en cada uno de los nodos y un estimado de la inversión final que se debe realizar para la implementación del diseño planteado.

TABLA 4-8. EQUIPOS REQUERIDOS EN EL NODO PASARELA

Componente	Características	Referencia	Cantidad	Valor Unitario	Total
MAP	2.4 GHz	Linksys WAP55AG	1	\$ 380.000	\$ 380.000
Cable coaxial	25 metros, punchado con conectores N Macho - N Macho	Teletronics LMR400	1	\$ 310.500	\$ 310.500
Cable adaptador	30 centímetros, N Macho - N Macho	Teletronics	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Cable adaptador	RPSMA- N Macho	Teletronics	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Protector para descargas	2.4 GHz	Teletronics LTNG2400-GD	1	\$ 200.000	\$ 200.000

Antena directiva de grilla	24 dBi	Hyperlink ML2424G	1	\$ 227.000	\$ 227.000
Amplificador	1 W	HyperAmp HA2401G- 1000	1	\$ 1'125.000	\$ 1'125.000
Soporte de antena	---	---	1	\$ 300.000	\$ 300.000
Accesorios de instalación	Cintas, correas tornillos, clavos, etc.	---	---	\$ 200.000	\$ 200.000
VALOR TOTAL					\$ 2'892.500

TABLA 4-9. EQUIPOS REQUERIDOS EN CADA UNO DE LOS NODOS DE SOPORTE

Componente	Características	Referencia	Cantidad	Valor Unitario	Total
MAP	2.4 GHz	Linksys WAP55AG	1	\$ 380.000	\$ 380.000
Cable coaxial	25 metros, ponchado con conectores N Macho – N Macho	Teletronics LMR400	1	\$ 310.500	\$ 310.500
Cable adaptador	30 centímetros, N Macho – N Macho	Teletronics	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Cable adaptador	RPSMA– N Macho	Teletronics	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Protector para descargas	2.4 GHz	Teletronics LTNG2400-GD	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Antena omnidireccional	15 dBi	Hyperlink HG2415U-PRO	1	\$ 595.700	\$ 595.700
Soporte de antena	---	---	1	\$ 300.000	\$ 300.000
Sistema de panel solar	Tipo W	---	1	\$ 5'950.000	\$ 5'950.000
Torre de comunicaciones	Soportadas de 30 m	---	1	\$ 13'000.000	\$ 13'000.000
Accesorios de instalación	Cintas, correas tornillos, clavos, etc.	---	---	\$ 200.000	\$ 200.000
VALOR TOTAL					\$ 21'086.200

TABLA 4-10. EQUIPOS REQUERIDOS EN CADA UNO DE LOS NODOS CLIENTE

Componente	Características	Referencia	Cantidad	Valor Unitario	Total
Tarjeta inalámbrica	2.4 GHz, Estándares 802.11b/g, 200 mW, Adaptador PCI	Linksys WMP54G	1	\$ 167.000	\$ 167.000
MAP	2.4 GHz	Linksys WAP55AG	1	\$ 380.000	\$ 380.000

Cable coaxial	25 metros, ponchado con conectores N Macho – N Macho	Teletronics LMR400	1	\$ 310.500	\$ 310.500
Cable adaptador	30 centímetros, N Macho – N Macho	Teletronics	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Cable adaptador	RPSMA– N Macho	Teletronics	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Protector para descargas	2.4 GHz	Teletronics LTNG2400-GD	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Antena omnidireccional	15 dBi	Hyperlink HG2415U-PRO	1	\$ 595.700	\$ 595.700
Soporte de antena	---	---	1	\$ 300.000	\$ 300.000
Accesorios de instalación	Cintas, correas tornillos, clavos, etc.	---	---	\$ 200.000	\$ 200.000
VALOR TOTAL					\$ 2 '303.200

TABLA 4-11. PRESUPUESTO ESTIMADO PARA LA CONEXIÓN DE LA MICRORED DE SAN CARLOS

Tipo de nodo	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Nodo pasarela	1	\$ 2 '892.500	\$ 2 '892.500
Nodos de soporte	15	\$ 21 '086.200	\$ 189 '775.800
Nodos Clientes	9	\$ 2 '303.200	\$ 20 '728.800
VALOR TOTAL			\$ 213 '397.100

Realizando un resumen de lo hecho hasta este punto se observa que el análisis realizado en el capítulo 2 acerca de las capacidades y alcances de los estándares en su modo de operación en malla, y los criterios definidos en el capítulo 3 para el diseño de redes inalámbricas en malla fijas para entornos rurales; permitieron concluir que la tecnología IEEE 802.11x presenta mayores ventajas en cuanto a costos, simplicidad, flexibilidad, presencia en el mercado, calidad de servicio y desarrollo de la tecnología estudiada. A partir de esta selección se logró definir un modelo de red para la microred de San Carlos realizando cada uno de los pasos de la ingeniería de radioenlace y determinando cada uno de los componentes que debe tener una WMN para que pueda aplicarse a cualquier red de entorno rural. De la estimación de costos para la instalación de la red puede concluirse que la solución se ajusta a un presupuesto rural y por lo tanto es viable su implementación.

Para comprobar el correcto funcionamiento del diseño planteado y establecer la máxima capacidad de la red en cuanto al número de llamadas VoIP soportadas ante factores como múltiples saltos, simultaneidad de llamadas y caída de nodos, en el siguiente capítulo se realiza la implementación del diseño de la red en una herramienta muy útil y versátil para la simulación de redes.

5. SIMULACIÓN A NIVEL DE SISTEMA DE LA RED INALÁMBRICA EN MALLA EHAS-SILVIA CON LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN NCTUns 3.0

5.1 INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN

El acelerado desarrollo de las técnicas de procesamiento y los avances en las tecnologías de distribución de la información provocan que las redes de comunicaciones entren en una era de cambios fundamentales que les permitan adecuarse, al incansable avance de la tecnología. Este desarrollo del área de las telecomunicaciones, así como la aparición de servicios de red novedosos y cada vez más complejos, han llevado a los proveedores de tecnologías, a las empresas de telecomunicaciones, a las universidades y a grupos de investigación, a desarrollar principalmente tres técnicas para evaluar el desempeño de las diferentes tecnologías de red; dichas técnicas son: el análisis, la simulación y la experimentación.

Sin embargo, considerando la complejidad de las nuevas topologías, los protocolos y el tráfico de las redes, es generalmente imposible construir un modelo analítico que pueda cubrir todos los aspectos técnicos. Por lo tanto, la mayoría de las técnicas analíticas se utilizan solamente para la evaluación del desempeño de una red en funcionamiento. Por otro lado, generalmente resulta costoso construir una red experimental para evaluar su desempeño. Por estas razones, los programas que permiten simular diferentes tecnologías de telecomunicaciones, se utilizan con gran frecuencia ya que facilitan el análisis de las redes y representan además, una reducción en los costos y el tiempo en el diseño y planeación de los sistemas de comunicaciones.

Por medio de estos programas de simulación, es posible probar diferentes topologías de red; permitiendo así detectar posibles fallas antes, durante y después de la implementación física de dicha topología. Por otra parte, los simuladores de redes facilitan los estudios de tráfico, enrutamiento, gestión y rendimiento de las redes actualmente implementadas.

De esta manera surge un área dentro de las telecomunicaciones dedicada al desarrollo de herramientas de simulación de redes, fortaleciendo la investigación y la experimentación de arquitecturas de redes más complejas; ya que dichas actividades de investigación e ingeniería recurren constantemente a la simulación para estudiar y verificar el comportamiento dinámico de algoritmos, protocolos y aplicaciones y estudiar los parámetros, propiedades y funcionamiento de los sistemas, de manera más sencilla y económica comparada con una implementación real.

Las redes inalámbricas en malla son una tecnología emergente en el mercado que promete mejorar significativamente las comunicaciones en entornos metropolitanos, sin embargo, los costos en equipos y componentes aún son muy altos. Considerando la gran potencialidad de las metodologías y herramientas *software* de simulación de redes para el estudio y acercamiento de nuevas tecnologías, se decidió verificar el funcionamiento del diseño obtenido en el capítulo 4 a través de una herramienta de simulación que permita observar el comportamiento de la topología de malla en el transporte de VoIP. A continuación se realiza una descripción de la herramienta *software* de simulación seleccionada, la justificación de su elección, funcionamiento, y además sus ventajas frente a otras.

5.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La selección del *software* para las simulaciones se realizó mediante la comparación de las principales herramientas existentes, enfocándose principalmente en aquellas que operan bajo licencia GPL, las cuales han evolucionado y tienen un amplio campo en áreas como: la industria, el comercio, la investigación, la academia y el desarrollo de aplicaciones. Dichos programas incluyen sus propios editores gráficos o por código, que permiten a los usuarios diseñar y modelar las topologías de red en estudio. También incluyen herramientas para configurar parámetros y características propias de cada red. Algunas de las herramientas de simulación más importantes para las redes inalámbricas son: NS2, OMNETT, NCTUns 3.0, OPNET IT Guru AE, entre otras. Sin embargo, no todas implementan la topología de malla, por esta razón el estudio de las herramientas de simulación se limitó al Simulador de Redes 2 (*Network Simulator*, NS2) y el Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung 3.0 (*National Chiao Tung University Network Simulator*, NCTUns 3.0) que cuentan con esta capacidad. A

continuación se realiza una descripción de cada una de estas herramientas y finalmente se define la herramienta a utilizar.

5.3 NS2 [84]

NS2 es un simulador de eventos discretos creado por la Universidad de Berkeley, se orienta a la investigación y al estudio de redes y permite realizar simulaciones de múltiples tipos de redes (cableadas, inalámbricas y por satélite). La simulación tiene en cuenta tanto la topología de la red como el tráfico generado por la misma con el fin de crear un diagnóstico que muestre el comportamiento de la red.

Este simulador implementa protocolos como TCP y UDP que pueden generar tráfico FTP, Telnet, Web, Velocidad Constante de Bit (*Constant Bit Rate*, CBR) y Velocidad Variable de Bit (*Variable Bit Rate*, VBR). Maneja diversos mecanismos de sistemas de colas que se generan en los enrutadores, también permite simular QoS como por ejemplo INTSERV y DIFFSERV.

Para definir una simulación en NS2 se utiliza un *script* llamado Lenguaje de Herramientas de Comando (*Tool Command Language*, TCL) que permite definir los distintos elementos de la red y su comportamiento, por lo tanto se debe aprender este lenguaje para el desarrollo del modelo de simulación. El simulador siempre ejecuta los eventos en el orden que se especifica en la lista de eventos, los cuales se ordenan por tiempo.

NS2 dispone de una interfaz gráfica para visualizar las simulaciones llamada Animador de Red (*Network Animator*, NAM), la cual contiene un editor gráfico que permite crear animaciones sin la necesidad de usar código TCL. A través de NAM se puede visualizar los flujos de paquetes, colas y posibles descartes, así como comportamientos del protocolo: comienzo lento de TCP, control de congestión, retransmisión rápida, recuperación, movimiento de nodos de redes inalámbricas, notas de los sucesos más importantes y estados del protocolo.

Entre las características de esta herramienta se encuentran:

- Es un *software* libre, con distribución de código abierto, que puede descargarse gratuitamente de la página: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- Esta herramienta se puede trabajar sobre el sistema operativo Windows y Unix/Linux.
- Si bien no posee una interfaz gráfica de fácil manejo, si es cierto que se pueden realizar simulaciones sencillas de manera simple, profundizando posteriormente hasta el nivel de complejidad deseado.
- Se utiliza tanto en entornos de investigación como en entornos educativos.
- Implementa protocolos a nivel de transporte como UDP, TCP, RTP, así como protocolos de enrutamiento de tipo *multicast* para redes cableadas e inalámbricas.
- A pesar de que implementa protocolos MAC para redes inalámbricas IEEE 802.11 con el mecanismo de acceso CSMA/CA y múltiples saltos, estos módulos no se han validado por los creadores del simulador [85].
- Enfocándose en las redes inalámbricas en malla existen algunos desarrolladores que han implementado protocolos de enrutamiento para redes *ad hoc* como AODV, DSR, ZRP, OLSR, entre otros, sin embargo, en el capítulo 1 se realizó una descripción de las diferencias existentes entre las redes *ad hoc* y las WMNs en factores como las múltiples interfaces, interconexión con otro tipo de redes y capacidad de procesamiento que no se consideran en estas implementaciones. Además, estos protocolos aún no están validados por los creadores del simulador [86].

5.4 NCTUns 3.0 [87]

NCTUns es un simulador y emulador de redes y sistemas de telecomunicaciones avanzado. NCTUns es *software* libre y se ejecuta sobre Linux; además utiliza una metodología de simulación que entra y modifica el Kernel de Linux, lo cual hace que el programa tenga ventajas únicas en comparación con otros simuladores y emuladores de redes de comunicaciones. NCTUns recibió varios reconocimientos a nivel internacional, debido a las prestaciones que ofrece y al desarrollo del programa; algunos de estos reconocimientos son: MobiCom 2002 y 2003, Reporte especial en el revista de la IEEE Julio de 2003, IEEE MASCOTS 2004, IEEE *vehicular technology society*, IEEE INFOCOM 2005, etc. Esto evidencia el impacto que causa este programa en el ambiente de la simulación de redes de comunicaciones. Este

simulador permite desarrollar, evaluar y diagnosticar el desempeño de protocolos y aplicaciones en diferentes tipos de redes. Las simulaciones hechas con esta herramienta, cuentan con características muy especiales, ya que NCTUns simula en tiempo real y con una interfaz similar a la de los sistemas reales, lo cual permite familiarizar más al usuario con el manejo del diseño, configuración e implementación de aplicaciones en redes de comunicaciones.

NCTUns utiliza una sintaxis sencilla pero muy efectiva para describir la topología, los parámetros y la configuración de una simulación, esta descripción se genera a partir de la interfaz gráfica del usuario. Esta herramienta fue desarrollada basándose en el simulador NS, de ahí su nombre, sólo que incluye una interfaz más amigable para la implementación de los modelos de red que se simulan. Este programa permite la simulación de arquitecturas de redes sencillas, sin embargo, su mayor potencial está en la simulación de redes tan complejas como las redes de Servicio General de Paquetes de Radio (*General Packet Radio Service*, GPRS), satelitales, ópticas e inalámbricas.

El NCTUns también puede utilizarse como emulador, especialmente para redes móviles e inalámbricas; para dichas aplicaciones provee recursos para manejo y estudio de sistemas de radiofrecuencia y permite obtener mediciones para establecer niveles de calidad de servicio de las señales irradiadas. El hecho de que el simulador permita definir obstáculos, trayectorias de movimiento y que los terminales móviles (como celulares GPRS y portátiles) se puedan desplazar siguiendo dicha trayectoria, al mismo tiempo en que se hacen mediciones de atenuación, interferencia y de ancho de banda, dan cuenta de las características sobresalientes y justifican los diferentes reconocimientos obtenidos a nivel mundial.

Adicionalmente, permite simular redes inalámbricas en malla y puede utilizarse fácilmente como un emulador, cuando se desee desarrollar funciones de desempeño de un *host* real y ver cómo se comportaría bajo diferentes tipos de condiciones de red sin modificar su protocolo interno. Esto quiere decir que tiene la posibilidad de emular un dispositivo de red del mundo real en su entorno gráfico e interconectarlo con dispositivos simulados o virtuales, para intercambiar paquetes. También posee una característica importante, la cual, sumado a lo anteriormente expuesto, hacen de NCTUns uno de los más poderosos simuladores de redes de telecomunicaciones: la arquitectura de sistema abierto, en la cual la Interfaz Gráfica de Usuario (*Graphical User Interface*, GUI) y el motor de simulación son elementos separados que utilizan un modelo cliente servidor, permite ejecutar simulaciones remotas, paralelas, distribuidas y concurrentes, lo cual permite entre muchas otras cosas, correr simulaciones simultáneamente en diferentes nodos de una red y cuyos resultados individuales sirven para el análisis de un sistema único. Esto quiere decir, que un usuario, puede enviar su proyecto de simulación a un servidor remoto que esté ejecutando el motor de simulación, utilizando su propia GUI y además correr múltiples simulaciones concurrentes en diferentes *hosts* conectados a dicho servidor.

Entre las características de esta herramienta se encuentran:

- Es un *software* libre, con distribución de código abierto, el cual se descarga gratuitamente de la página: <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw>.
- Utiliza directamente el conjunto de protocolos TCP/IP de Linux, por consiguiente se generan resultados de simulación de alta fidelidad y permite que la configuración y el uso de una red simulada, sea exactamente igual a los utilizados en redes IP del mundo real.
- Puede utilizar cualquier aplicación de UNIX existente en la vida real, como un generador de tráfico, además, puede utilizar las herramientas de configuración y monitoreo de UNIX.
- Puede simular una gran variedad de dispositivos de red, como: *hubs*, *switches*, enrutadores, estaciones móviles, puntos de acceso a la malla, teléfonos GPRS, etc., así como obstáculos para las señales inalámbricas, además ofrece alta velocidad de simulación.
- Simula varios protocolos de redes como: IEEE 802.3, IEEE 802.11b, IP, IP Mobile, Diffserv, RIP, UDP, TCP, RTP/RTCP/SDP, FTP, etc.
- Permite generar estadísticas de factores importantes para el tratamiento de la voz como retardo, *jitter*, pérdida de paquetes, tasa de pérdida de paquetes y *throughput* de entrada y salida a nivel MAC de cada una de las llamadas generadas.
- Permite simular redes inalámbricas en malla, compuestas por MAPs y MPPs, los cuales pueden correr STP y OSPF como protocolos de enrutamiento.
- Existe muy poca información sobre el funcionamiento y configuración del *software*.
- El anterior punto lleva a que sea mayor el tiempo de aprendizaje del simulador.
- El servicio de soporte que proporcionan los autores del proyecto NCTUns es deficiente y en algunas ocasiones no funciona.

5.5 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Analizando las características principales de cada uno de los simuladores se concluye que el simulador NCTUns 3.0 presenta mayores ventajas para la implementación de este proyecto, las cuales pueden resumirse en: una interfaz gráfica más intuitiva con respecto a la que presenta el simulador NS2, mayor facilidad para el desarrollo de los diseños de red, configuración y adaptación de los mismos, así como múltiples herramientas para el análisis de todas las fases de estudio de un sistema, incluyendo diseño, simulación y recolección de datos. Por otro lado, posee una amplia librería de dispositivos de red, lo cual proporciona una aproximación más real y práctica de la teoría, lo que no sucede con el simulador NS2.

Una de las características más importantes del NCTUns 3.0 es que permite simular obstáculos que bloquean la línea de vista entre dos puntos, de esta manera se pueden diseñar y estudiar de una forma más real redes para entornos rurales como la requerida en este proyecto.

Además, el simulador NCTUns 3.0 presenta algunas características que se recomendaron en la evaluación de los criterios para la selección de la tecnología (Tabla 4-1) entre las cuales se encuentran: la velocidad de datos soportada por el estándar 802.11b, la implementación de al menos 2 interfaces en los equipos de la malla, la posibilidad de evaluar diferentes codecs para el transporte de VoIP y la implementación de protocolos de enrutamiento de nivel 2 que concuerdan con las bases del nuevo estándar 802.11s.

En el Anexo F se define un modelo de simulación de red aplicando la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones para luego implementar la red inalámbrica en malla de la microred de San Carlos sobre el simulador NCTUns 3.0.






5.6 IMPLEMENTACIÓN DE LA WMN PARA LA MICRORED DE SAN CARLOS SOBRE EL SIMULADOR NCTUns 3.0

Para instalar el programa y realizar simulaciones sin ningún contratiempo, es necesario que se cumplan con los siguientes requerimientos mínimos a nivel *software* y *hardware*.

- Procesador Pentium de 1.6 Ghz.
- 256 MB RAM (512 MB Recomendado).
- 400 MB de espacio en el disco.
- Resolución de pantalla: 1024 X 768 o la resolución más alta, 256 o más colores.
- Sistema Operativo: Linux Red Hat Fedora Core 4.0

Además, a nivel *software*, es importante tener instalado un compilador gcc, el sistema Xwindows GNOME o KDE, que el usuario tenga los privilegios del administrador o *root* para el manejo del programa y que se asigne el *shell Bash /tcsh* al usuario para el manejo por comandos en el modo consola.

En el Anexo G se incluye una guía en la cual se detalla cómo trabajar la simulación de las redes inalámbricas en malla con el NCTUns 3.0. Para mayor información sobre descarga e instalación, el simulador NCTUns contiene un manual de usuario que describe paso a paso su correcta configuración [87]. A continuación se presenta una descripción de los procedimientos realizados para la implementación de la WMN para la microred de San Carlos.

Siguiendo el modelo de simulación definido en la sección F.3 del Anexo F, se procedió a identificar y ubicar cada uno de los nodos pertenecientes a la microred de San Carlos la cual se constituye por 28 nodos estáticos, de los cuales 15 nodos son de soporte y se representan en el simulador por puntos de acceso a la malla que implementan el protocolo de enrutamiento STP , 9 nodos cliente que se representan por equipos móviles configurados en modo infraestructura  y 1 nodo pasarela representado por una multigateway con soporte para malla  la cual se conecta por medio de enlaces cableados de 10 Mbps a 1 enrutador  y 1 equipo fijo  que suministran los servicios de red. Todos estos elementos se extienden en un área de 2000x2000 m. Para facilitar el proceso de ubicación de los

puntos de manera que conserven con mayor fidelidad las distancias relativas de cada establecimiento de salud y las condiciones de línea de vista entre los puntos, se hizo uso de una funcionalidad del simulador que permite cargar imágenes de fondo en el área de trabajo, de esta manera fue posible utilizar la imagen generada por la herramienta Radio Mobile, con la ubicación de todos los nodos y sus correspondientes líneas de vista. Sobre este fondo se ubicaron cada uno de los nodos y las obstrucciones presentes, representadas por las líneas de color naranja. La implementación final puede observarse en la Figura 5-1.

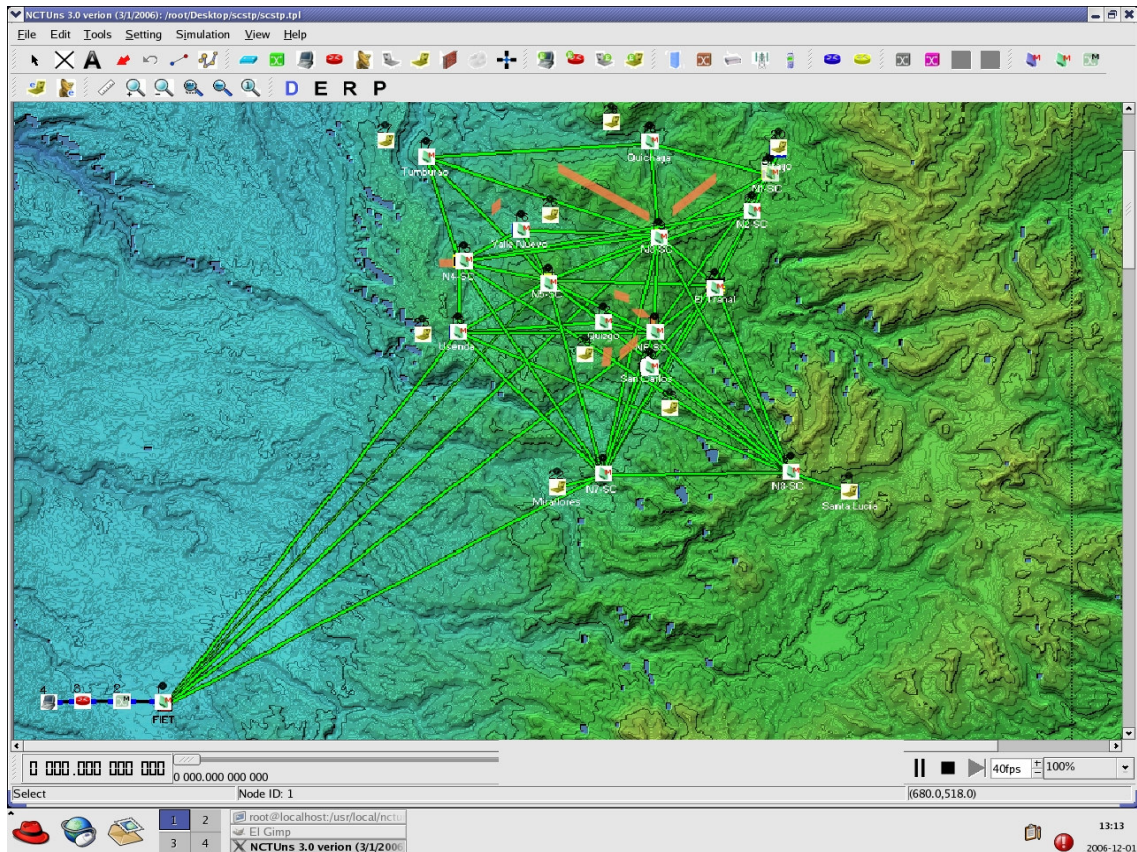


Figura 5-1. Implementación de la WMN para la microred de San Carlos sobre el simulador NCTUns

Todas las pruebas de la red se realizaron sobre el mismo diseño implementado, la simulación se ejecutó durante 100 segundos, de los cuales los primeros 10 segundos se utilizan por el simulador para configurar la red. La generación de llamadas de VoIP para cada uno de los equipos cliente se realizó utilizando una aplicación propia del simulador denominada *rtpsendrecv*, la cual permite enviar y recibir paquetes RTP. Esta aplicación también permite configurar los detalles de la llamada, tales como el tipo de codec a utilizar para los distintos tipos de datos (audio o video), la(s) dirección IP del nodo cliente al cual se desea llamar, puertos, tiempos de inicio y finalización de llamada, a través de un archivo de tipo SDP que se carga en cada uno de los nodos cliente.

Cada nodo de soporte tiene dos interfaces inalámbricas IEEE 802.11b con una capacidad de 11 Mbps, la primera opera en modo infraestructura para atender los nodos clientes, mientras la segunda opera en modo *ad hoc* para transmitir inalámbricamente los paquetes entre los demás nodos de soporte.

Con respecto al rango de comunicación entre dos puntos se aclara que no se tomaron valores reales de distancia debido a que el NCTUns se creó para simular el comportamiento de una red inalámbrica en malla basándose en el estándar 802.11b, el cual configura como máximo tiempo de propagación entre un transmisor y receptor $20 \mu s$. Si se toma como velocidad de la señal la velocidad de la luz, se obtiene una distancia máxima de transmisión de 6 Km ($d = V * t = 300.000.000 * 20 \mu s = 6 \text{ km}$). Por tal razón, en el momento de realizar pruebas de simulación se obtuvo que cuando la distancia entre dos puntos está en un rango de 0 a 6 Km los valores en el retardo de la transmisión toman rangos

menores a los 150 ms que se consideran adecuados para el transporte de voz. Sin embargo, cuando la distancia entre los nodos supera los 6 Km los valores del retardo se ven afectados considerablemente obteniendo valores de hasta 5 segundos que imposibilitan cualquier transmisión en tiempo real.

La mayoría de implementaciones reales de redes inalámbricas en malla y en general, redes de largo alcance han modificado los parámetros que por defecto configura el estándar 802.11b para obtener mayores alcances entre sus puntos, caso que por ejemplo se da en la nueva red de EHAS-Pacífico en la cual se alcanza una distancia de aproximadamente 90 Km con un solo salto. No obstante, para que el simulador NCTUns trabaje correctamente, es necesario conservar los parámetros que por defecto se fijan en el estándar y de esta manera es posible estudiar características más relevantes de las redes en malla como lo son los múltiples saltos, protocolos de enrutamiento, reestablecimiento de rutas ante caídas de nodos y evaluación de la capacidad máxima de llamadas VoIP soportadas según el tráfico que se le inyecta a la red, por esta razón, para todos los nodos de la microred de San Carlos se configuraron distancias proporcionales.

5.7 SIMULACIONES Y RESULTADOS

El propósito de esta sección es realizar las pruebas de simulación necesarias para verificar el funcionamiento correcto de la WMN implementada para la microred de San Carlos e identificar la capacidad máxima de la red en cuanto al número de comunicaciones de VoIP soportadas. Para tal fin, se establecieron unos escenarios de prueba que comprueban el desempeño de la red ante factores como la cantidad de saltos, simultaneidad de llamadas y reestablecimiento de rutas. En cada uno de estos escenarios se evaluó la capacidad máxima del sistema a partir de la medición de parámetros como el *throughput*, retardo, *jitter* y pérdida de paquetes para cada llamada teniendo en cuenta que una comunicación se considera adecuada cuando se cumplen con los siguientes límites:

- El máximo retardo en un sentido no debe ser mayor a los 150 ms según la recomendación ITU-T G.114.
- El *jitter* promedio no debe superar los 50 ms de acuerdo a uno de los proveedores más importantes de las redes inalámbricas en malla [8] y algunos autores como [26] [27] [28].
- El porcentaje de pérdida de paquetes para una conversación de voz debe ser menor al 3 % de acuerdo a la recomendación ITU-T G.1010 [29].

Todas las pruebas de simulación se realizaron sobre el modelo de red implementado para el simulador NCTUns en la sección 5-6, en cada escenario se generaron llamadas de VoIP utilizando el protocolo RTP configurado de la siguiente manera:

TABLA 5-1. CONFIGURACIÓN DE PROTOCOLO RTP

Codec	G.729
Velocidad de compresión	8 Kbps
Retardo de paquetización	20 ms
Carga útil del codec	20 Bytes

5.7.1 Escenario 1: Máxima Cantidad de Saltos Soportados

Para evaluar la máxima cantidad de saltos soportados por la microred de San Carlos se tomó como referencia uno de los nodos de la red sobre el cual se establecieron llamadas a otros nodos ubicados a diferentes saltos. Para el caso particular de esta microred se identificó que la máxima cantidad de saltos para comunicar dos nodos distantes era de 7 saltos, razón por la cual se tomo este valor como umbral de medida y se procedió a tomar los datos del *throughput*, retardo, *jitter* y pérdida de paquetes, presentes en cada llamada. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5-2, 5-3, 5-4 y 5-5 respectivamente.

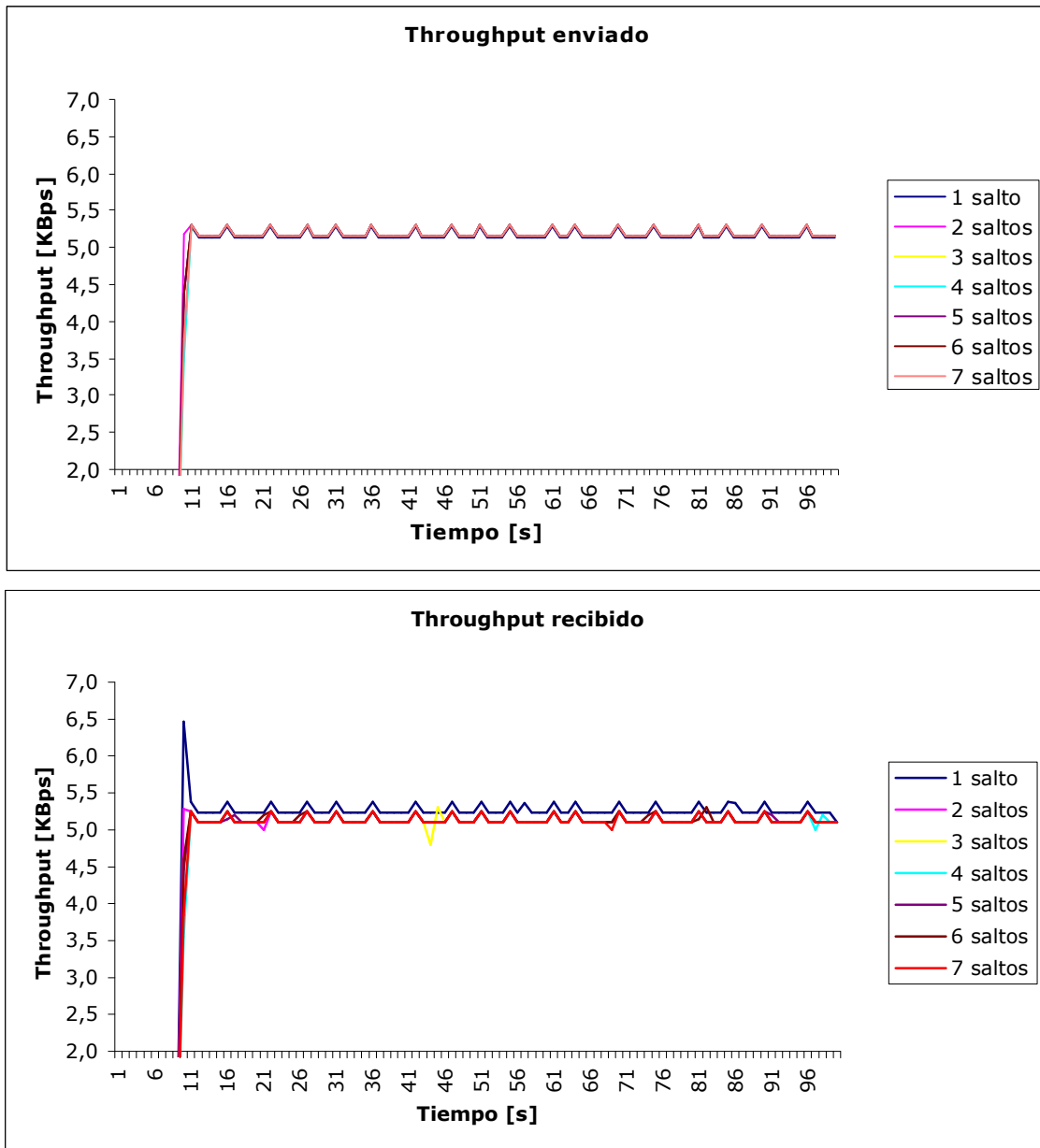


Figura 5-2. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas con múltiples saltos

En la Figura 5-2 se muestra la medida *throughput* enviado y recibido para cada una de las llamadas, cabe notar que el simulador NCTUns toma este valor como el número de Kilobytes por segundo (KBps) enviados y recibidos por un nodo determinado a nivel MAC, teniendo en cuenta que el valor del *throughput* enviado puede calcularse de la siguiente manera: si se utiliza el codec G.729 para la compresión de audio se está generando una carga útil de 20 Bytes, adicionalmente los protocolos RTP, UDP e IP generan 40 Bytes de encabezados, mientras que a nivel MAC se introducen 40 Bytes para el tratamiento de la malla, para un total de 100 Bytes por paquete, por otro lado, el codec G.729 genera 50 paquetes por segundo por lo cual se espera que el *throughput* enviado sea de 5 KBps. Por su parte, el *throughput* recibido puede tener valores menores debido a la pérdida de paquetes durante la transmisión por el aumento del tráfico en la red.

A partir del anterior análisis, puede observarse que existe una pequeña variación del *throughput* recibido con respecto al enviado que se incrementa a medida que aumenta el número de saltos debido a la necesidad de más tramas de control y gestión para controlar la llamada, lo cual incide directamente sobre el *throughput* de cada conversación.

A continuación se observa las medidas de retardo, *jitter* y pérdida de paquetes obtenidas para este escenario.

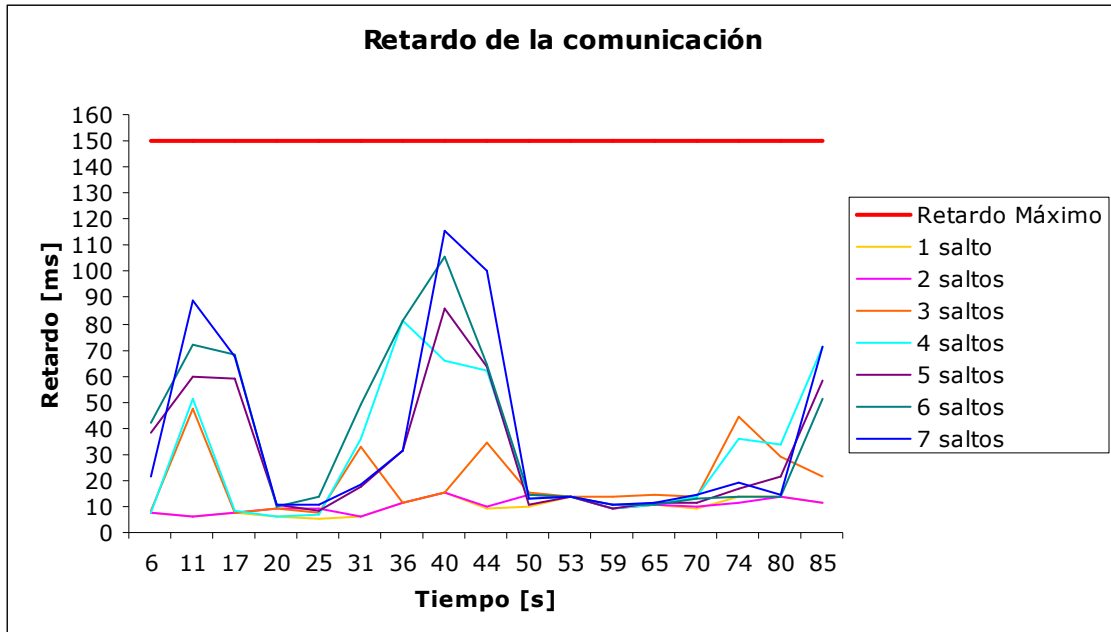


Figura 5-3. Medida del retardo para llamadas con múltiples saltos

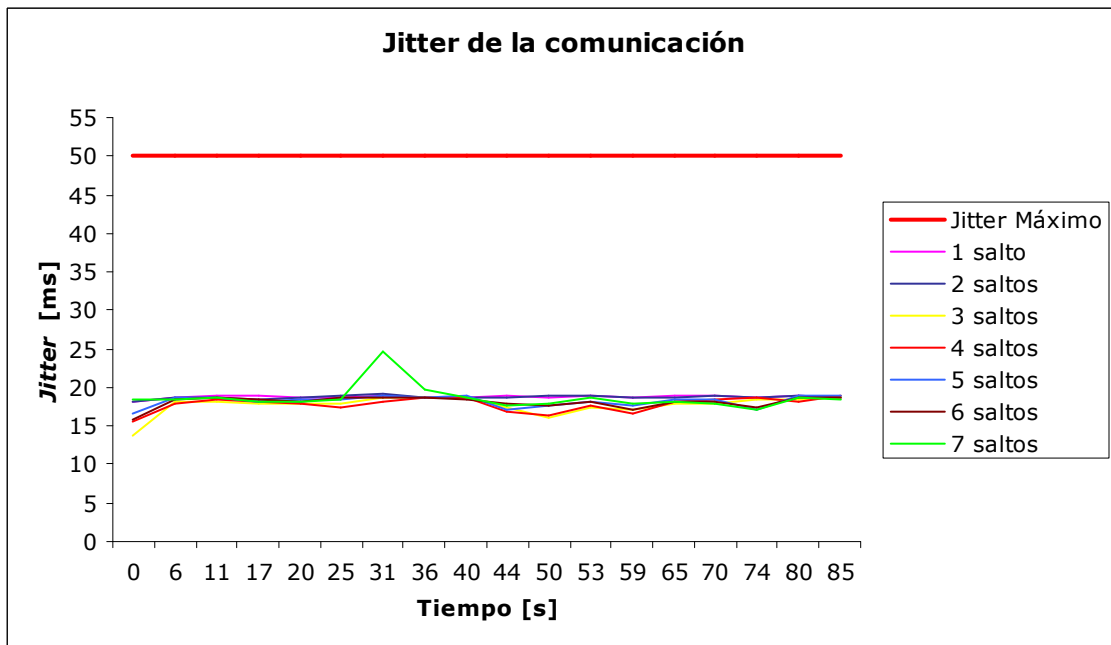


Figura 5-4. Medida del *jitter* para llamadas con múltiples saltos

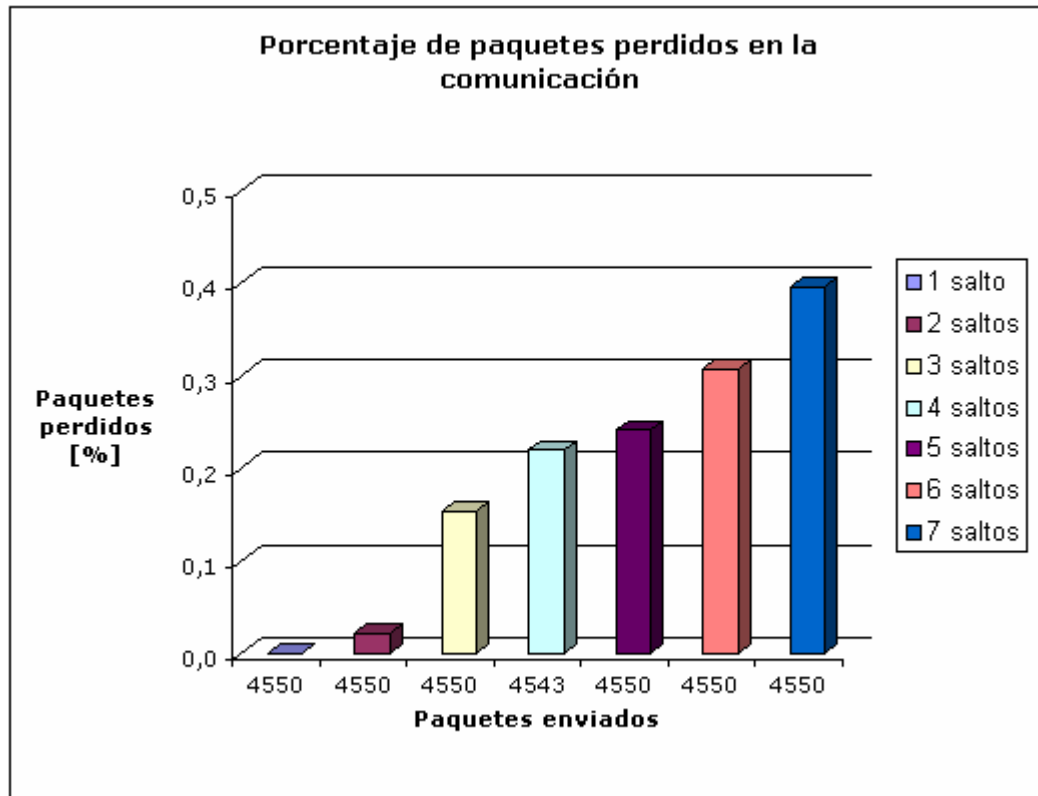


Figura 5-5. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas con múltiples saltos

En las Figuras 5-3, 5-4 y 5-5 se observa que los parámetros de calidad de la voz (retardo, *jitter* y pérdida de paquetes) aumentan de acuerdo a la cantidad de saltos presentes en la transmisión. Sin embargo, estos valores no exceden los límites permitidos para una comunicación adecuada, por lo cual se concluye que el número de saltos presentes en la red no imposibilitan el correcto establecimiento de las llamadas.

5.7.2 Escenario 2: Máxima Cantidad de Llamadas Simultáneas

La evaluación de este escenario permite identificar la incidencia del tráfico sobre la calidad de la voz. Para conseguir resultados que se aproximen en mayor medida a la operación real de la red se debe tener en cuenta el tipo de distribución de tráfico actual que presenta la microrred de San Carlos y el tipo de distribución adicional que permite la red en malla. Como se mencionó en el capítulo 3, el sistema de comunicación de esta zona se caracteriza por la emisión de llamadas desde cada uno de los puestos de salud hacia el hospital que los administra, sin embargo, con el diseño de la red en malla también es posible establecer una comunicación directa entre los puestos de salud sin tener que dirigirse primero hacia el hospital principal. Por lo tanto, en este escenario se evaluaron los dos tipos de distribución de tráfico.

5.7.2.1 Llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

En las Figuras 5-6, 5-7, 5-8 y 5-9 se presentan los resultados obtenidos cuando se realizan llamadas simultáneas desde los puestos de salud hacia el hospital de San Carlos. Cabe notar que cada uno de estos puestos de salud debe pasar por diferentes saltos para comunicarse con el hospital principal.

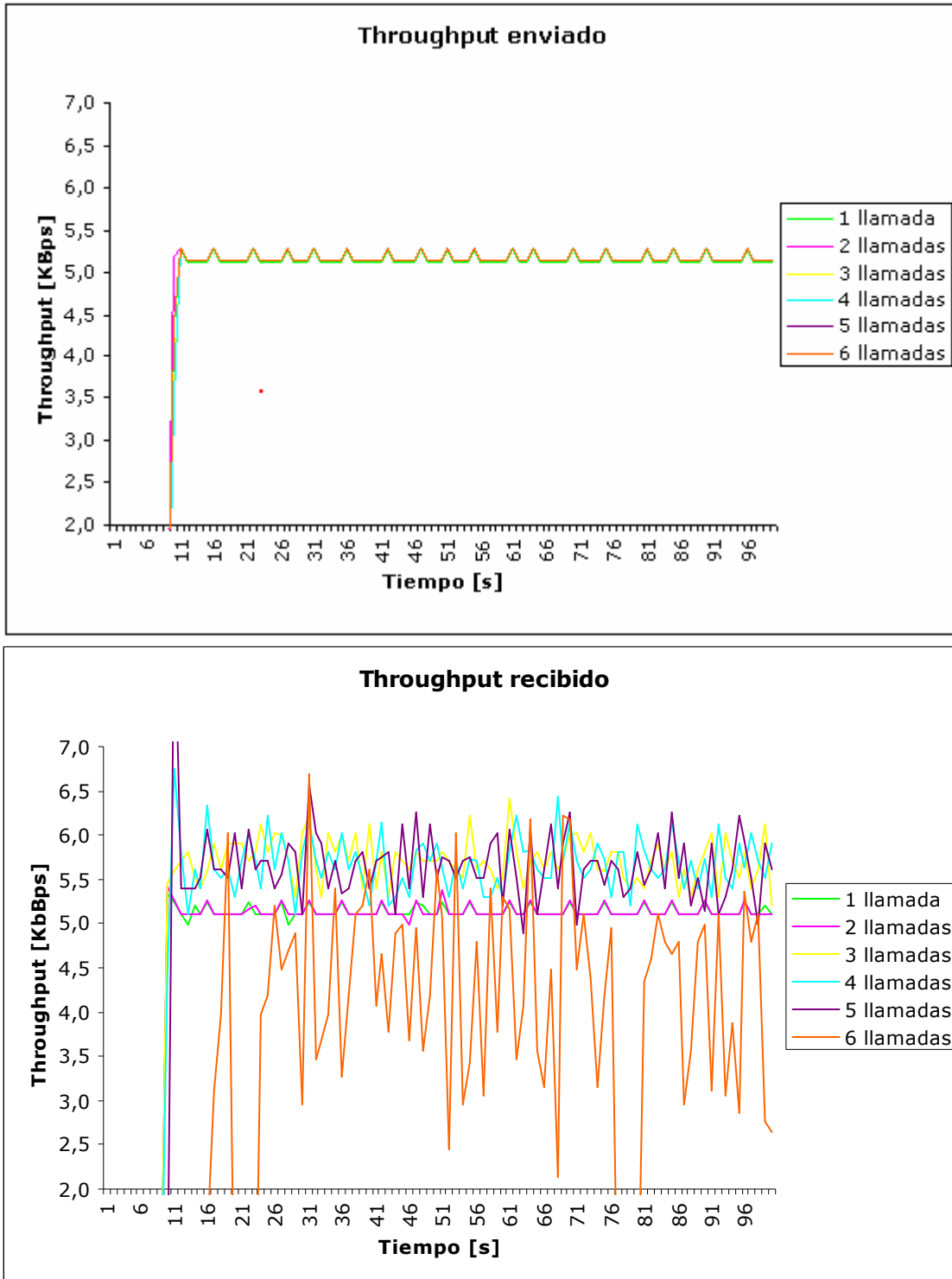


Figura 5-6. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

En la Figura 5-6 se demuestra que el *throughput* recibido es mucho menor que el enviado. Esto se debe a que al aumentar el número de llamadas en la red, existe una mayor competencia por el acceso al medio que provoca mayor congestión y pérdida de paquetes. Se observa por ejemplo, que la medida del *throughput* para 6 llamadas cae considerablemente y algunas veces llega a cero por lo cual puede esperarse que los resultados de retardo, *jitter* y pérdida de paquetes no sean adecuados para la generación de 6 llamadas consecutivas.

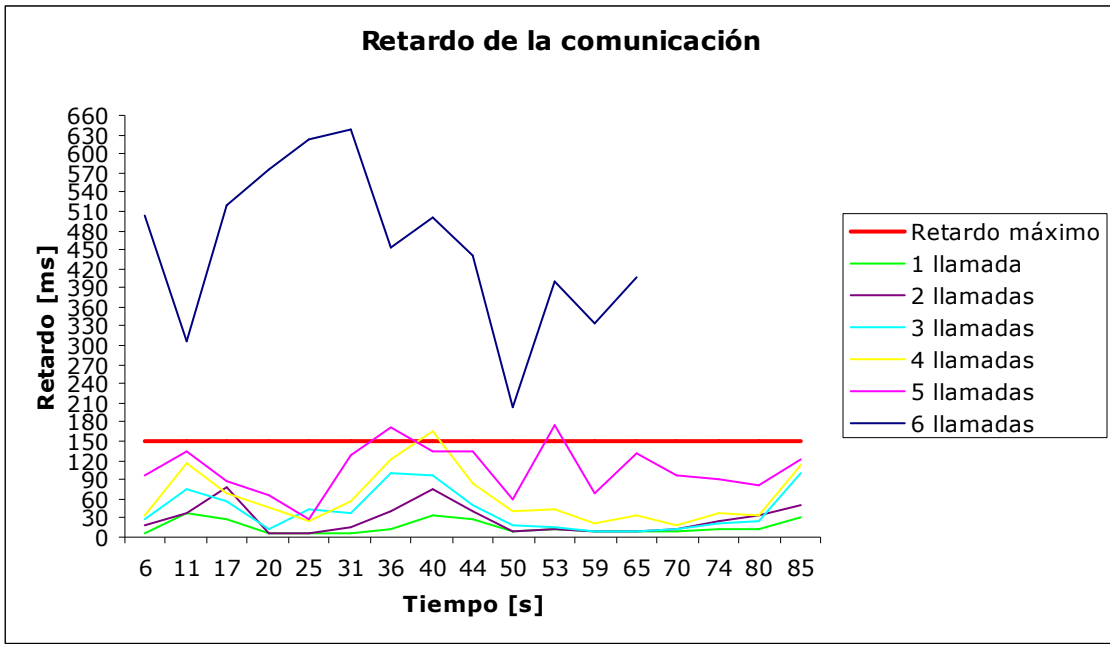


Figura 5-7. Medida del retardo para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

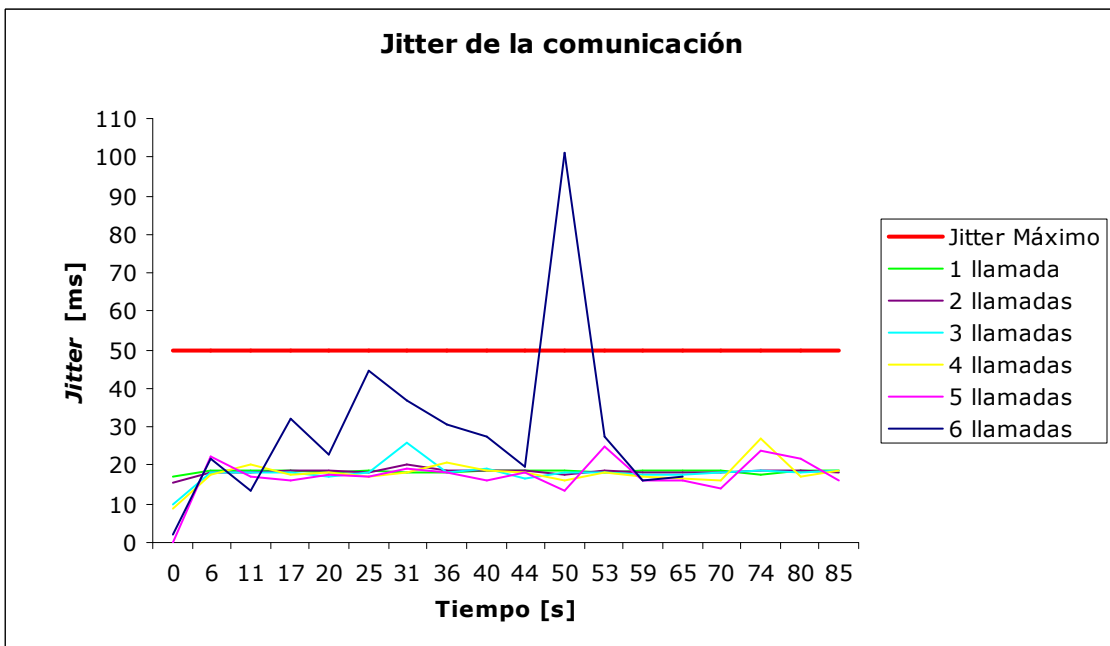


Figura 5-8. Medida del jitter para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

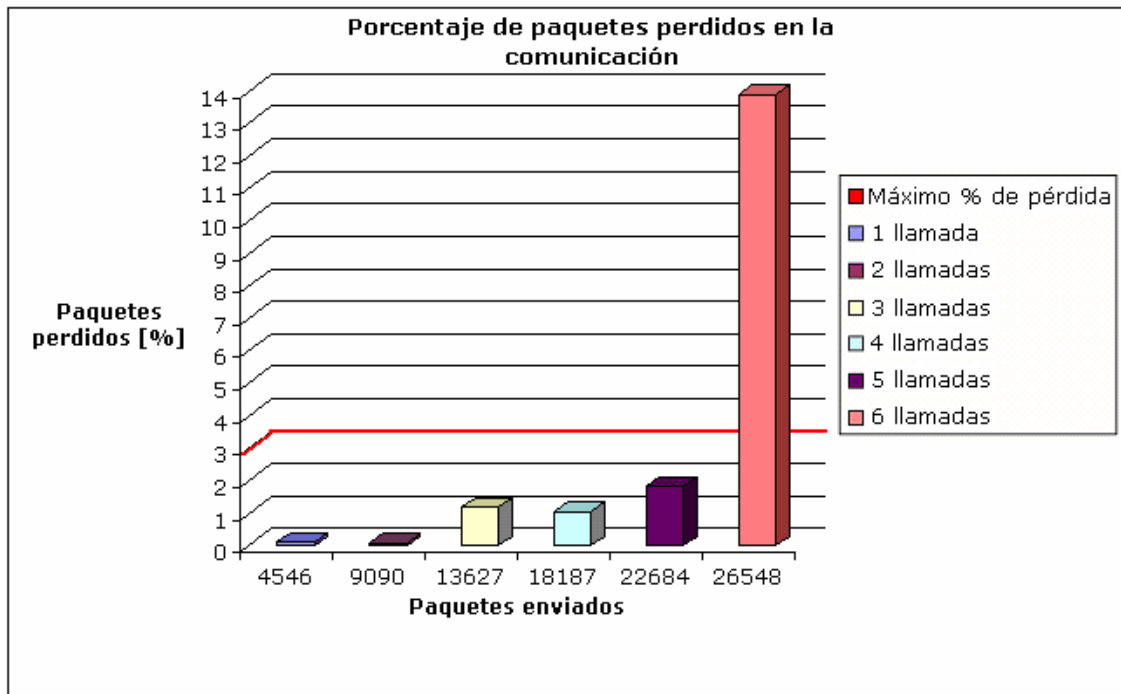


Figura 5-9. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

En las Figuras 5-7, 5-8 y 5-9 puede observarse que los valores de retardo, *jitter* y pérdida de paquetes no superan los límites para una óptima comunicación de voz hasta las 5 llamadas simultáneas, después de este punto estos factores aumentan considerablemente. Este resultado implica que 5 de los 8 puestos de salud pueden comunicarse al tiempo con el hospital de San Carlos, lo cual es sumamente provechoso en situaciones de emergencia donde es necesario comunicar varios puestos de salud con el hospital central.

5.7.2.2 Llamadas simultáneas entre los puestos de salud

Además de evaluar el caso de comunicación más común en la red actual, es interesante observar el comportamiento de la red ante la realización de llamadas simultáneas entre los diferentes puestos de salud, pues este podría ser un servicio adicional que mejoraría el sistema de comunicación de la zona.

Para realizar esta prueba se realizaron llamadas entre puestos de salud lejanos que deben atravesar múltiples saltos para establecer la comunicación. Los puestos de salud interconectados fueron: Tumburao-Miraflores, Pitayó-Santa Lucia, Quichayá-San Carlos, Valle Nuevo-Pitayó y Santa Lucia-San Carlos. En las Figuras 5-10, 5-11, 5-12 y 5-13 se encuentran los resultados obtenidos en este escenario.

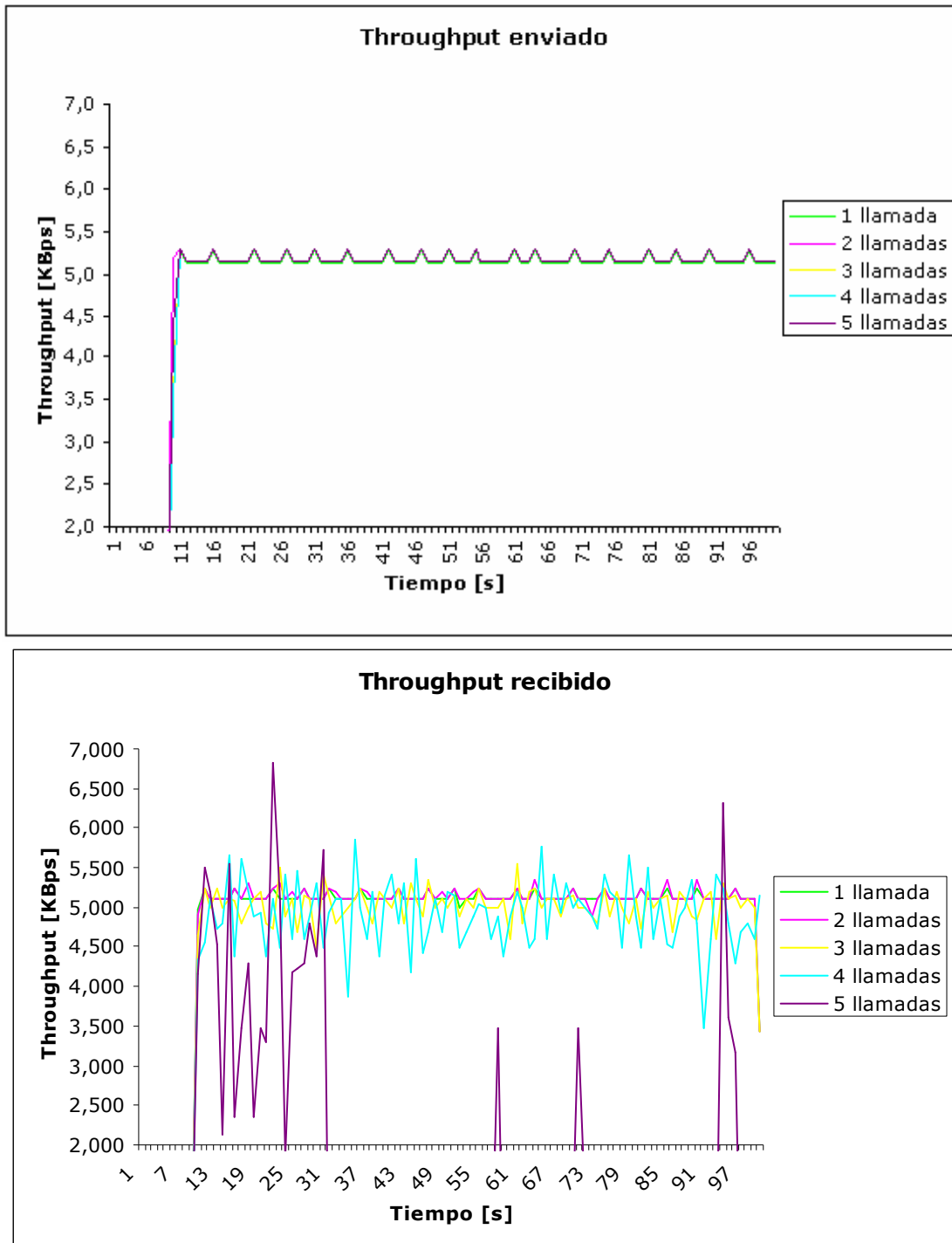


Figura 5-10. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas entre los puestos de salud

Al igual que en el anterior escenario, el aumento de llamadas en la red incide directamente sobre su desempeño, como se observa en la Figura 5-10 el *throughput* recibido cae a cero cuando se realizan 5 llamadas simultáneas pues el número de nodos de soporte utilizados para retransmitir los paquetes es mayor debido a que hay más saltos y por lo tanto el número de paquetes perdidos es muy alto como para soportar otra llamada.

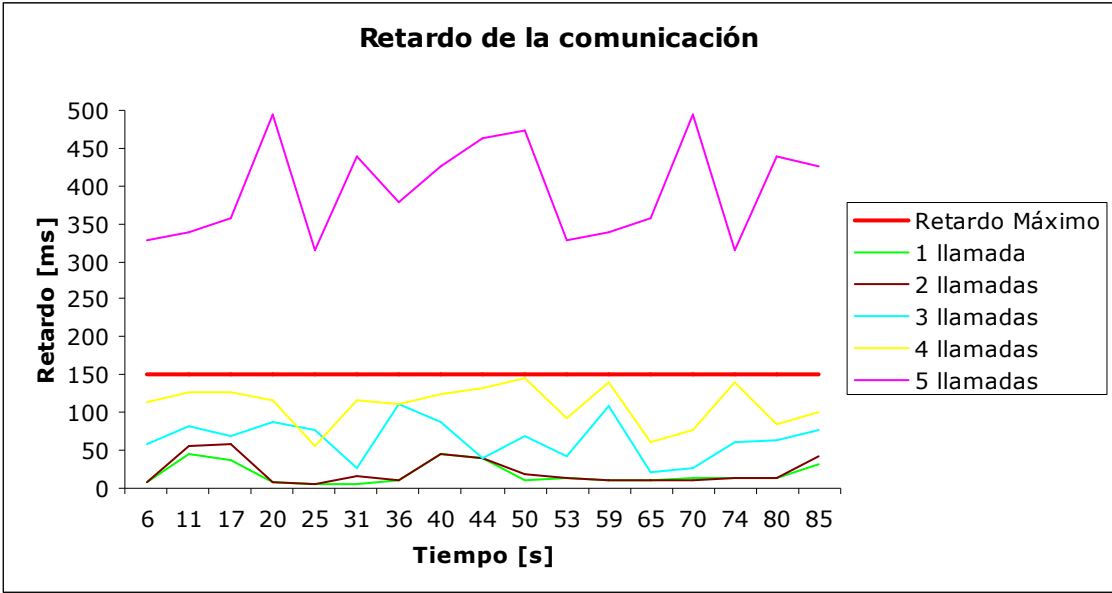


Figura 5-11. Medida del retardo para llamadas simultáneas entre los puestos de salud

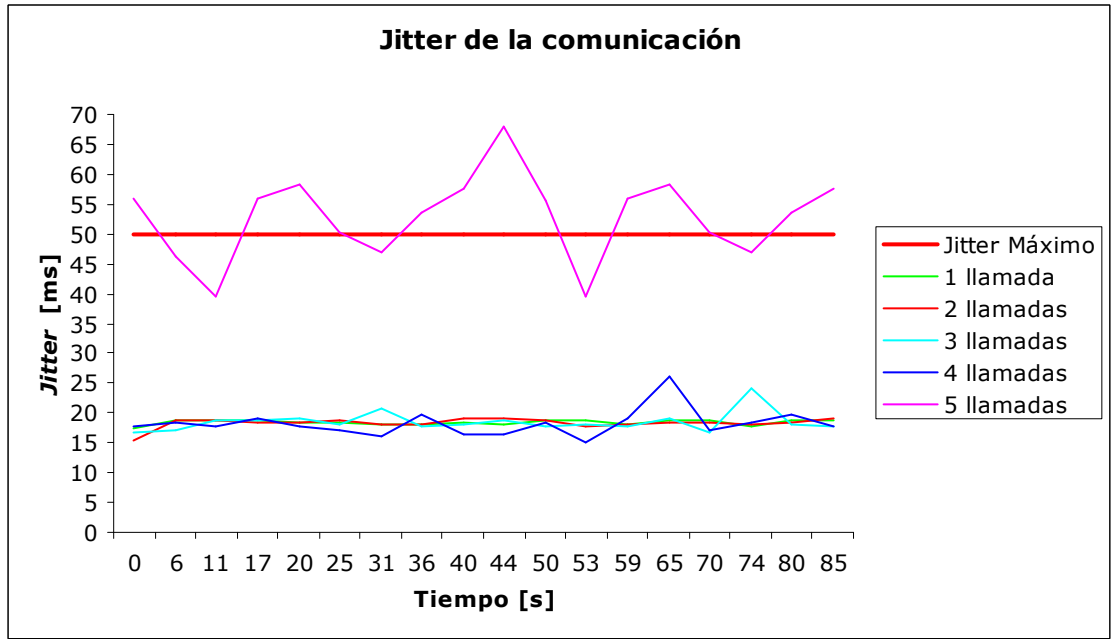


Figura 5-12. Medida del *jitter* para llamadas simultáneas entre los puestos de salud

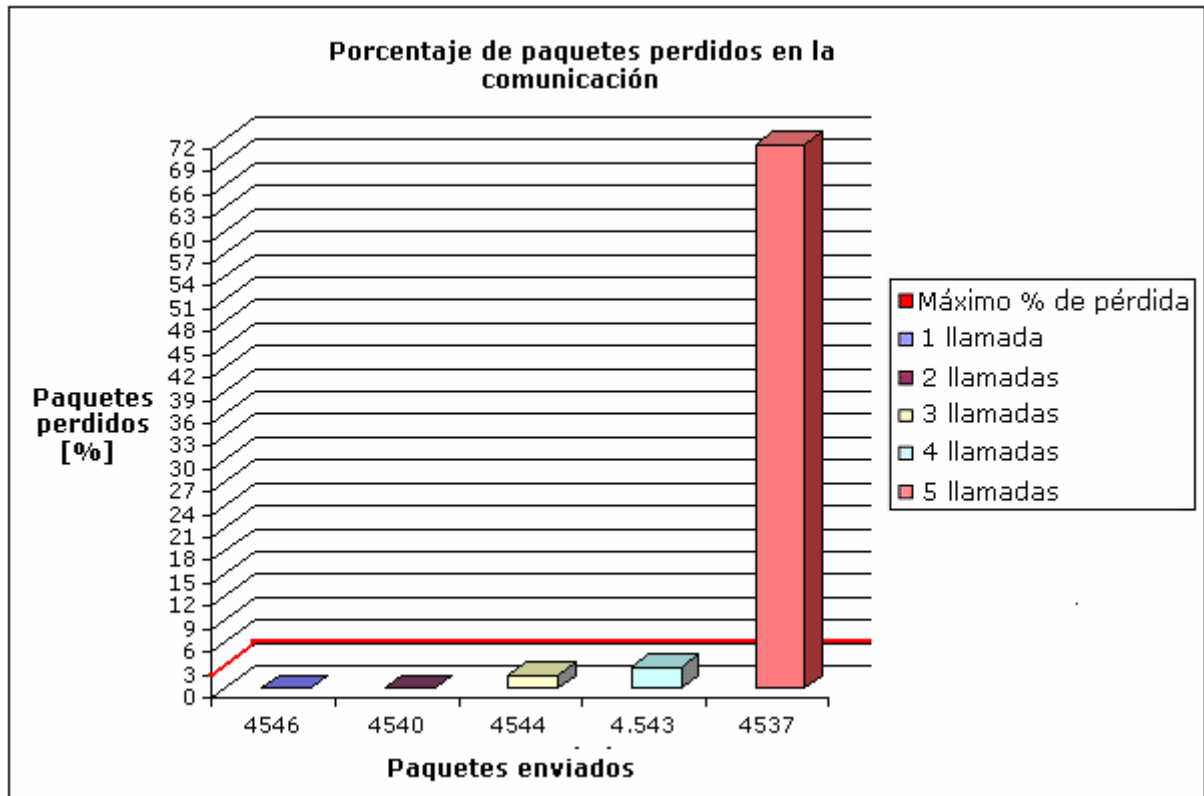


Figura 5-13. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas entre los puestos de salud

Los resultados obtenidos en las Figuras 5-11, 5-12 y 5-13 permiten observar que existe un menor desempeño de la red cuando las llamadas simultáneas se realizan a diferentes puntos en lugar de a un solo punto, esto se debe a que en este caso los nodos de la red no sólo manejan el tráfico generado por ellos mismos para la comunicación con otro punto sino que también actúan como enrutadores de otros nodos y por lo tanto deben manejar un tráfico de reenvío que generalmente consume gran cantidad de los recursos de la red antes de alcanzar su destino final.

Por otro lado, con el fin de evaluar la capacidad de la red en las peores condiciones los nodos que se tomaron para esta prueba fueron los más distantes entre sí, lo cual también reduce la cantidad de llamadas soportadas. Para corroborar el anterior análisis se realizó una prueba más en la cual se tomaron nodos más cercanos con menor cantidad de saltos y como puede observarse en las Figura 5-14, 5-15, 5-16 y 5-17 el desempeño de la red vuelve a mejorar obteniendo un máximo de 7 llamadas soportadas.

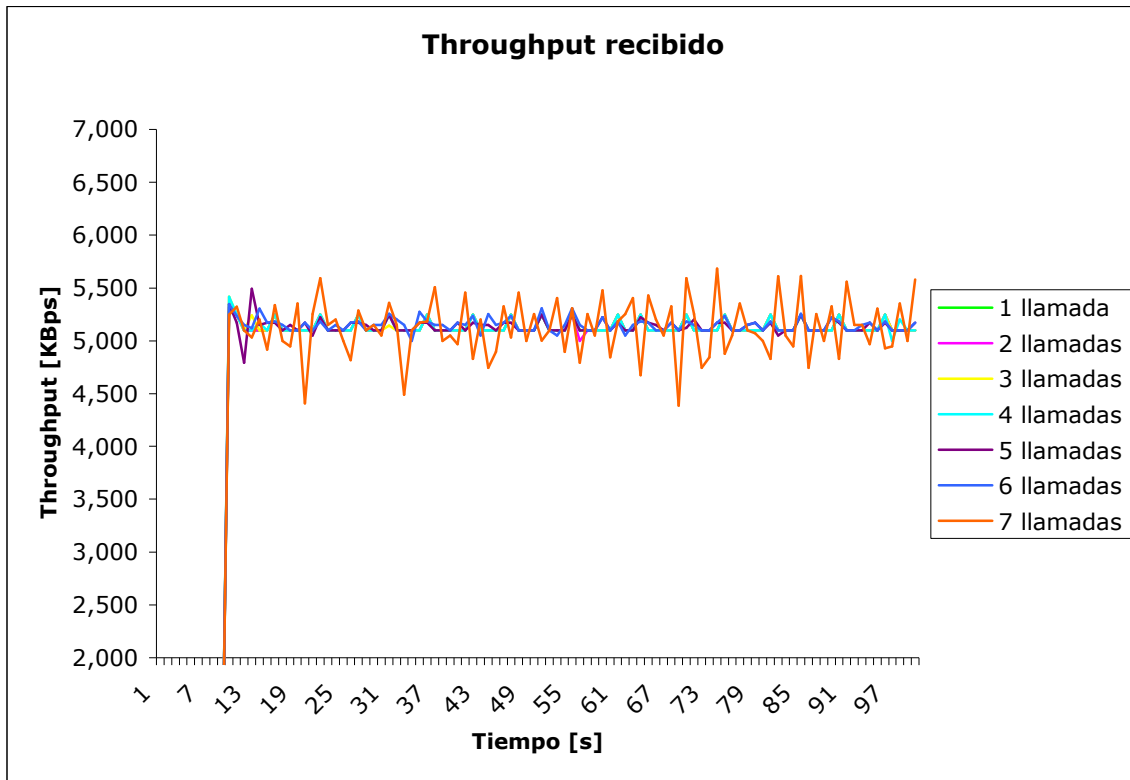
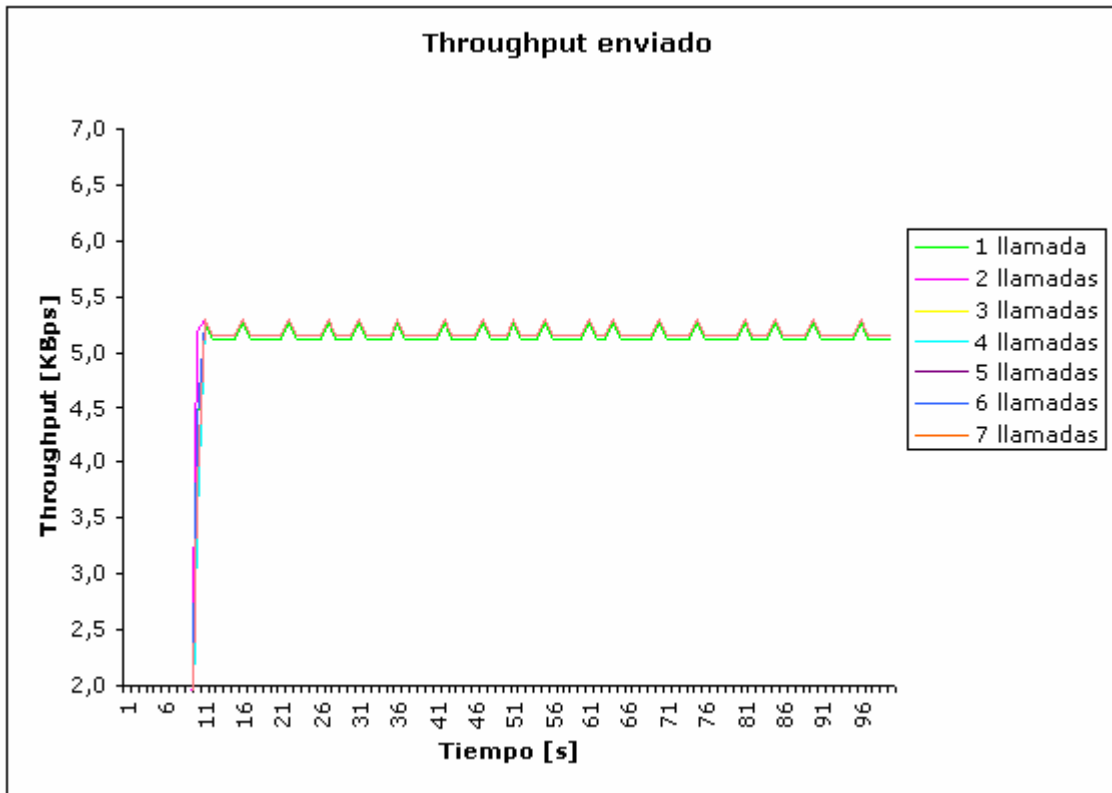


Figura 5-14. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos

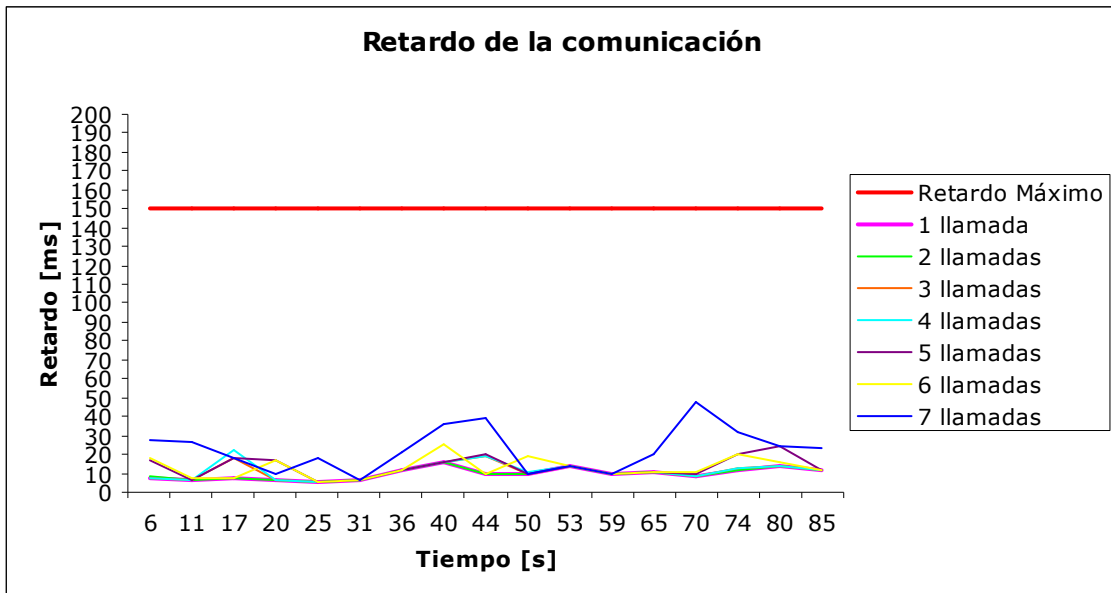


Figura 5-15. Medida del retardo para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos

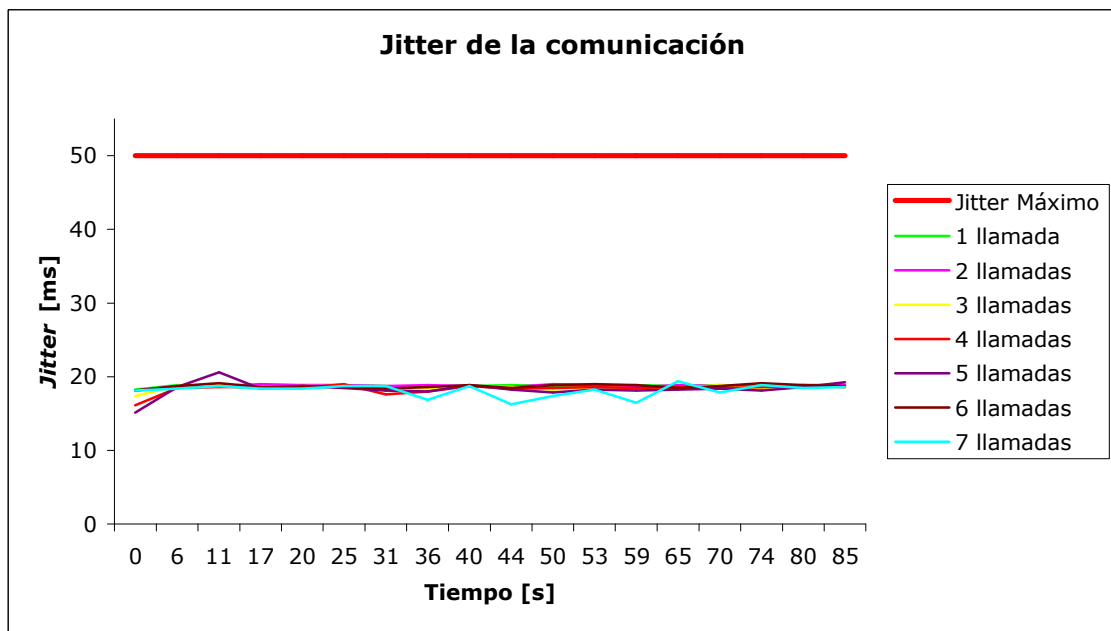


Figura 5-16. Medida del *jitter* para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos

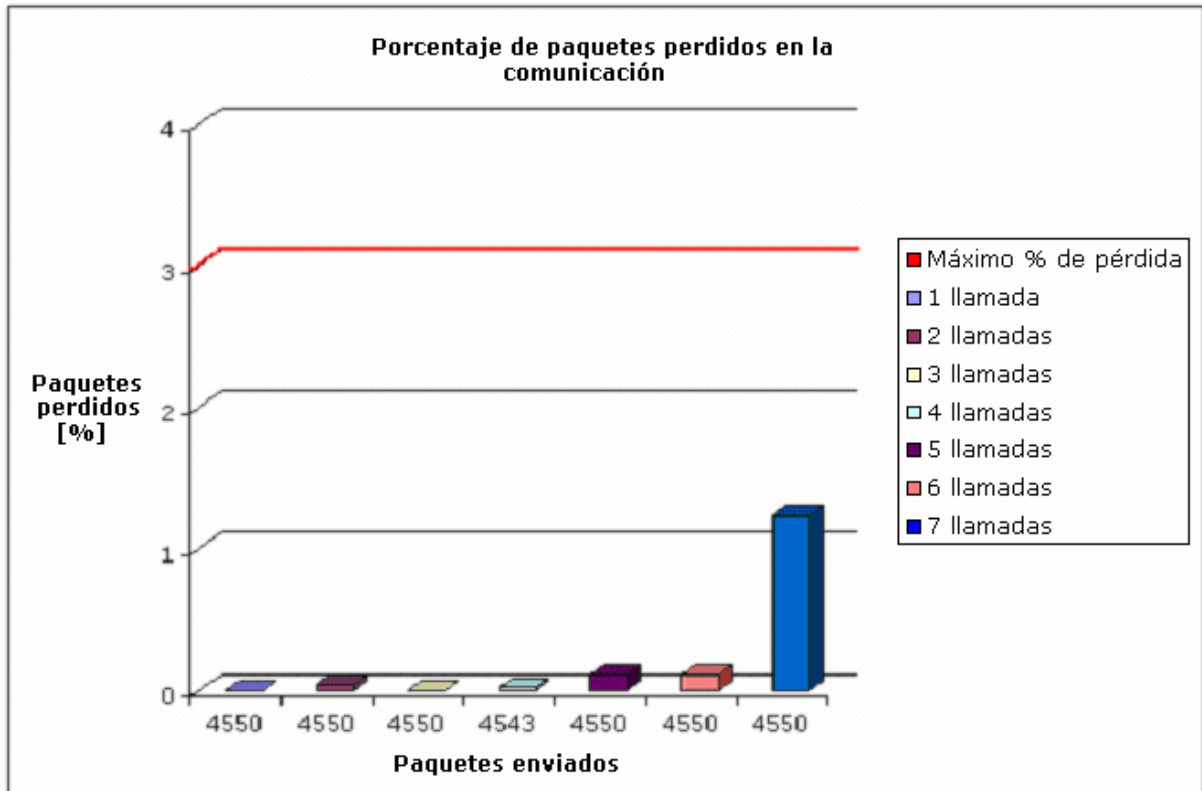


Figura 5-17. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos

5.7.3 Escenario 3: Reestablecimiento de Rutas

Una de las principales ventajas que tiene la topología de malla es la posibilidad de reestablecer una ruta ante la caída de un nodo, esto puede ser muy provechoso en un entorno rural donde las operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo se dificultan debido a que generalmente los puntos de acceso se encuentran en lugares muy lejanos y dispersos.

Las pruebas de este escenario permiten determinar el máximo número de conexiones que pueden restablecerse ante la caída de un nodo y el tiempo de reestablecimiento de un enlace caído. Al igual que en el escenario anterior, se evaluaron los dos tipos de distribución de tráfico: con llamadas simultáneas al hospital de San Carlos y llamadas simultáneas entre los puestos de salud (más lejanos).

Para realizar las pruebas se generaron llamadas entre puntos distantes que se comunican entre sí a través de varios nodos de enrutamiento, después de unos segundos de emisión uno de los nodos de soporte se cae y en ese momento el protocolo de enrutamiento debe actualizar sus rutas para reenviar el tráfico por una ruta alterna. En el instante de la caída de un nodo la comunicación se pierde, por lo tanto, el simulador no puede medir los valores de retardo y *jitter* hasta que el protocolo establezca una nueva ruta, este comportamiento se observa en las Figuras 5-18 a 5-25 donde cada llamada empieza con valores aceptables de retardo y *jitter*, luego no muestra valores por la caída del nodo y finalmente vuelve a reestablecerse.

5.7.3.1 Llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

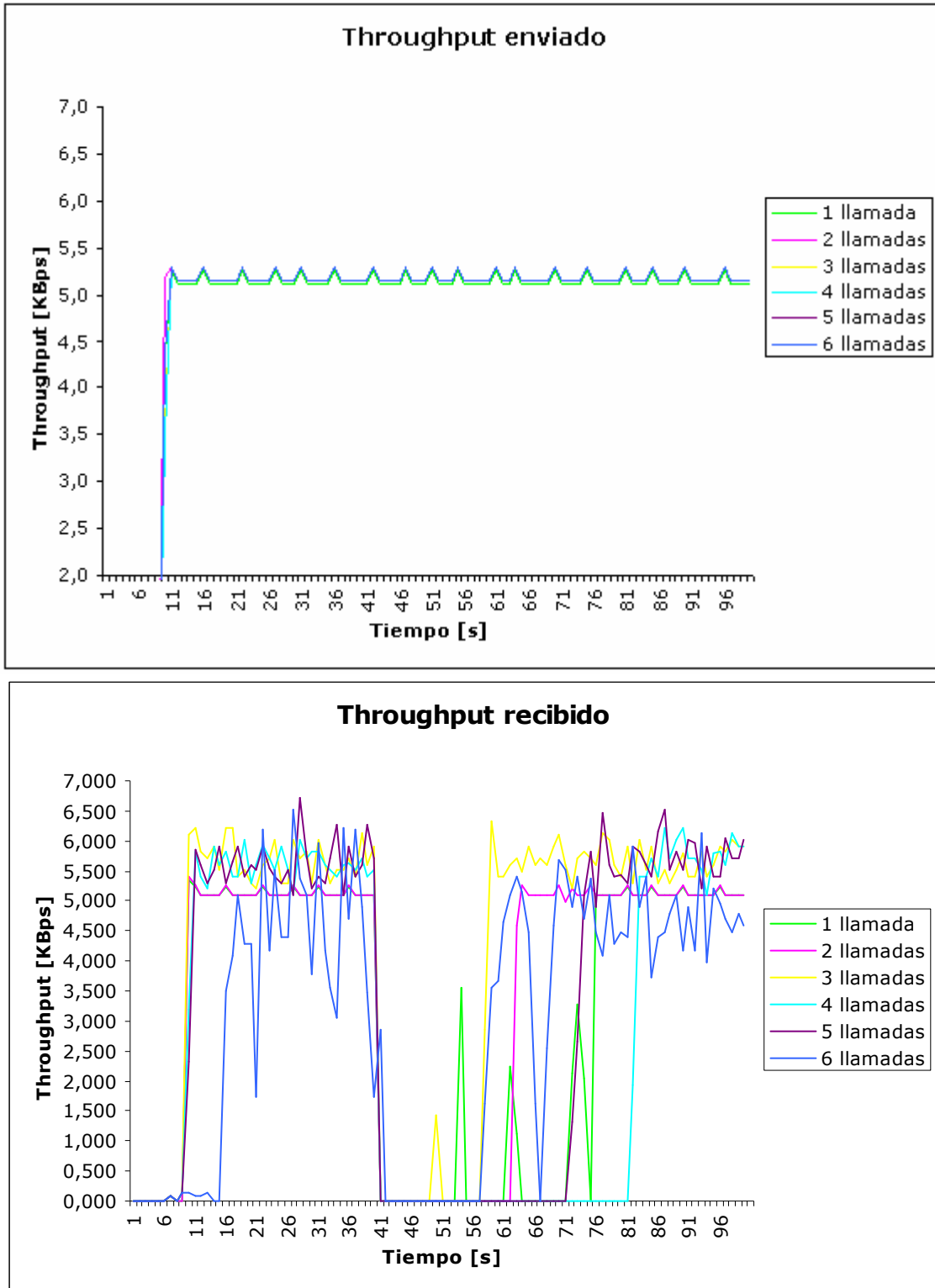


Figura 5-18. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

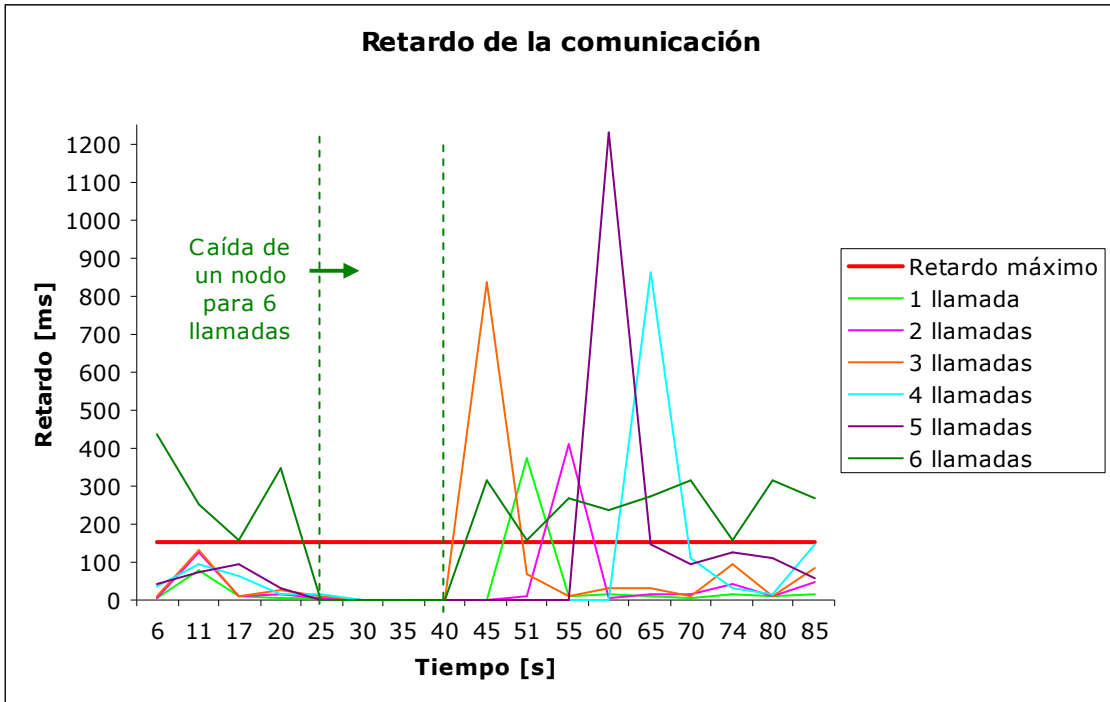


Figura 5-19. Medida del retardo para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

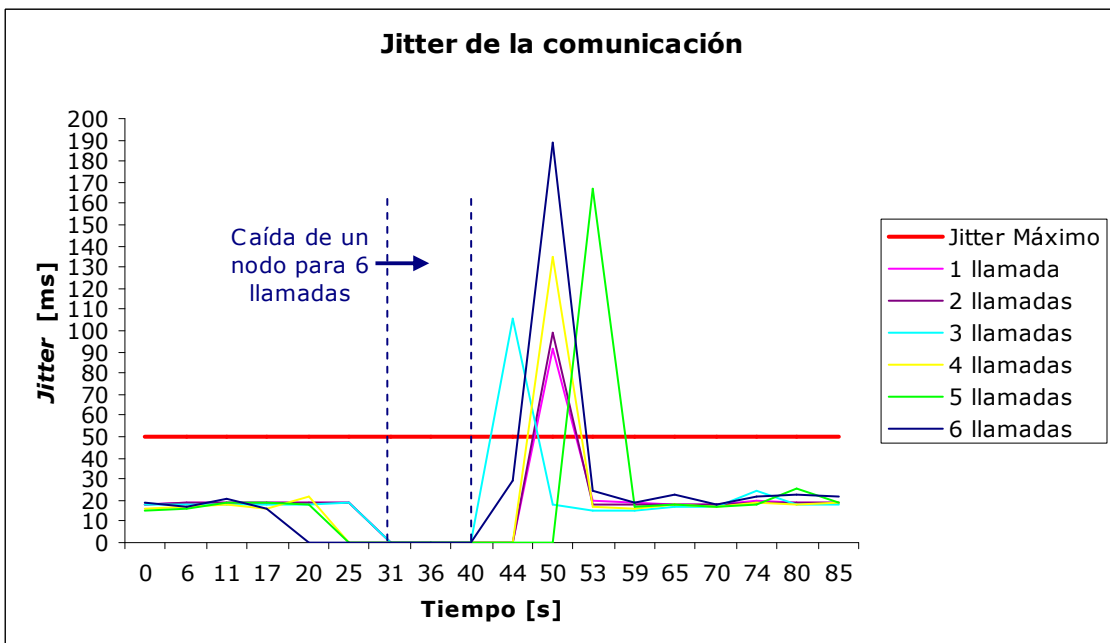


Figura 5-20. Medida del *jitter* para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

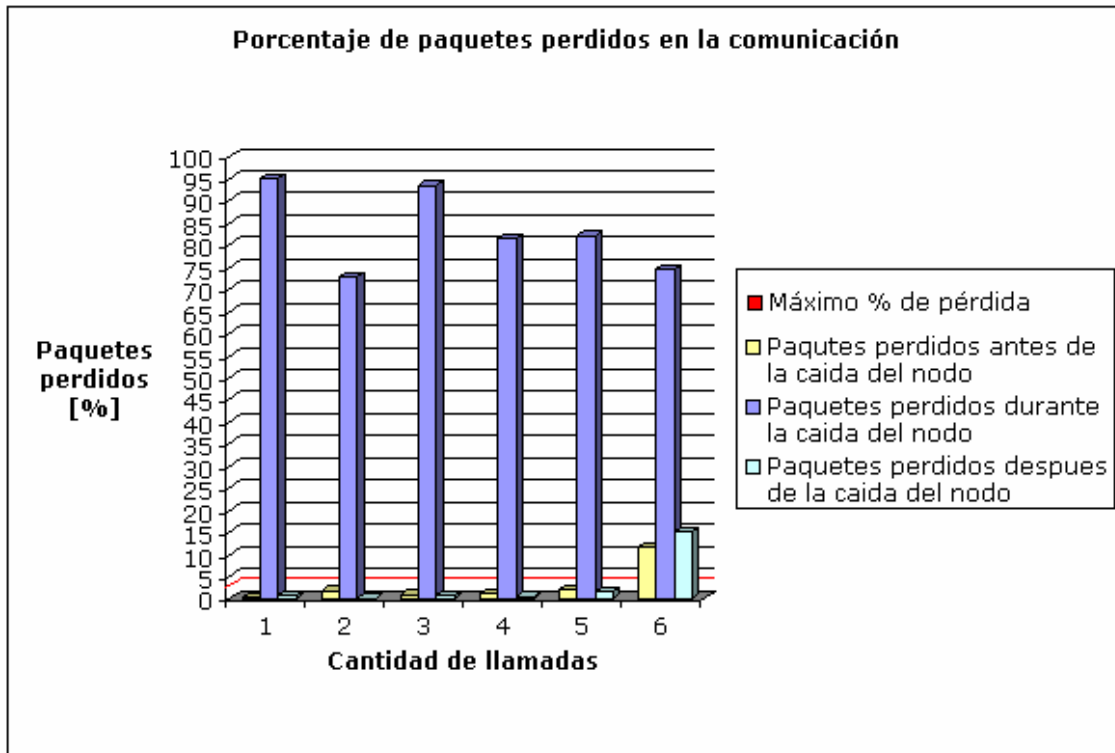


Figura 5-21. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

De los resultados obtenidos para la prueba de llamadas simultáneas al hospital de San Carlos puede analizarse que el restablecimiento de una ruta presenta gran incidencia sobre los factores que afectan la calidad de la voz, el comportamiento demuestra que el restablecimiento de la ruta dura aproximadamente 20 segundos, sin embargo, después de este proceso los parámetros analizados necesitan de un tiempo extra de aproximadamente 10 segundos para encontrarse de nuevo dentro de los límites permitidos. Esto permite concluir que en este caso, el servicio de comunicación definitivamente se pierde, pero el puesto de salud no queda incomunicado por mucho tiempo pues después de unos segundos se habilita automáticamente una ruta de respaldo. Caso contrario a lo que sucede con la tecnología actual implementada que ante este problema necesita desplazar a la zona personal capacitado para reparar la falla, lo cual puede tardar varios días y mientras tanto el servicio de comunicación se suspende totalmente.

5.7.3.2 Llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud

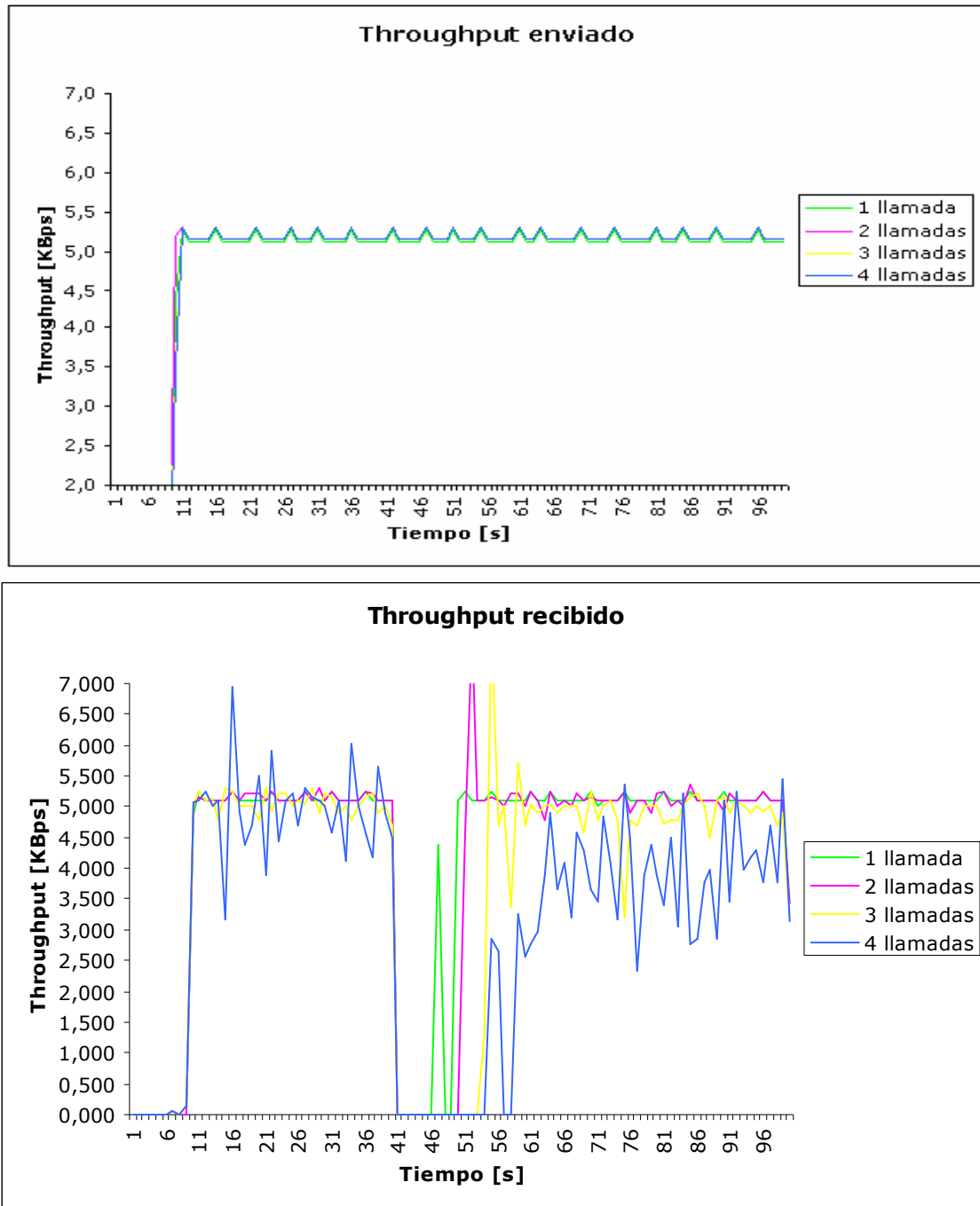


Figura 5-22. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud

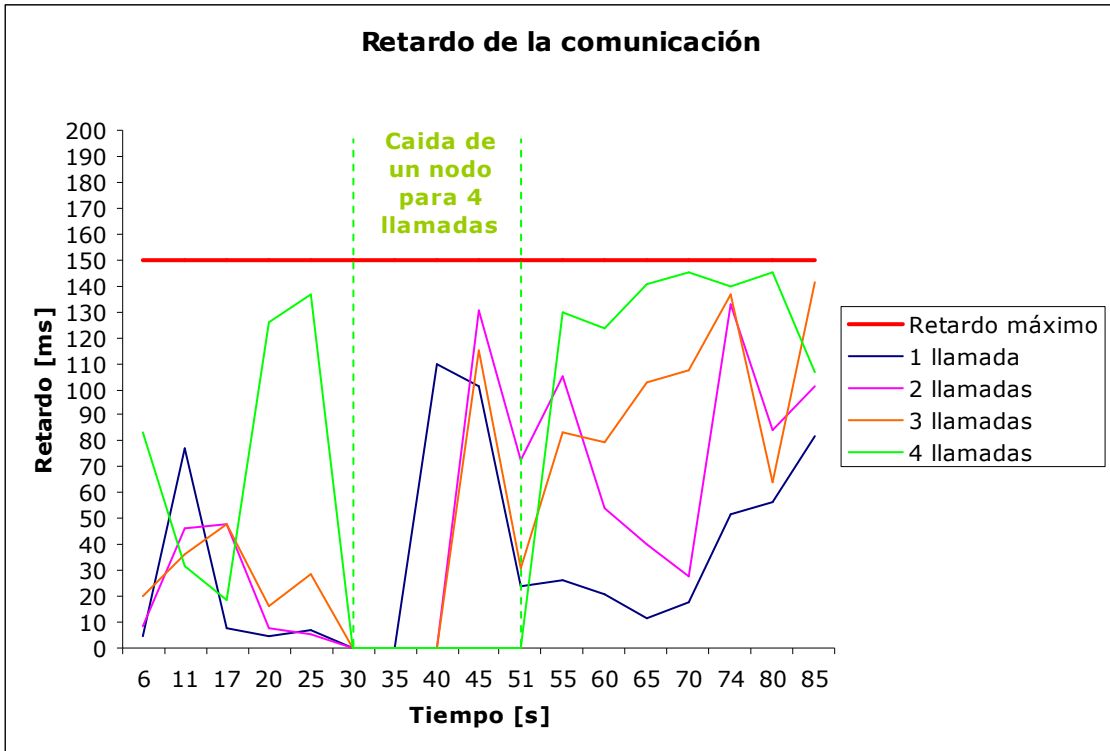


Figura 5-23. Medida del retardo para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud

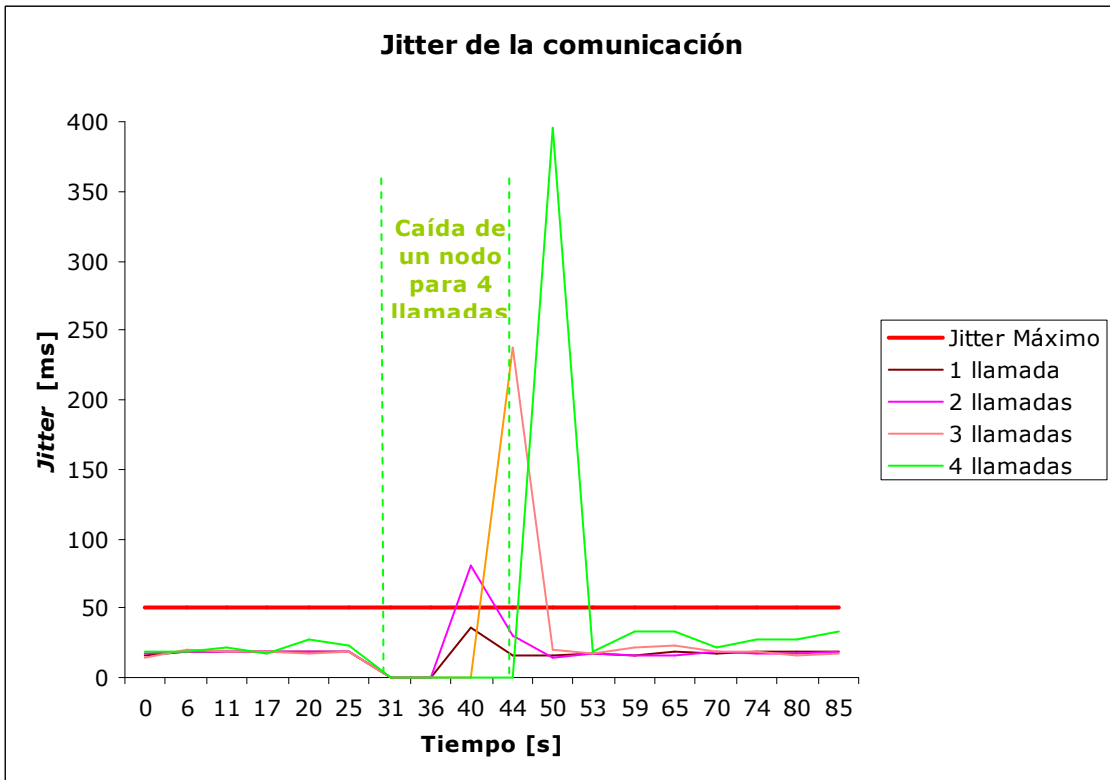


Figura 5-24. Medida del *jitter* para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud

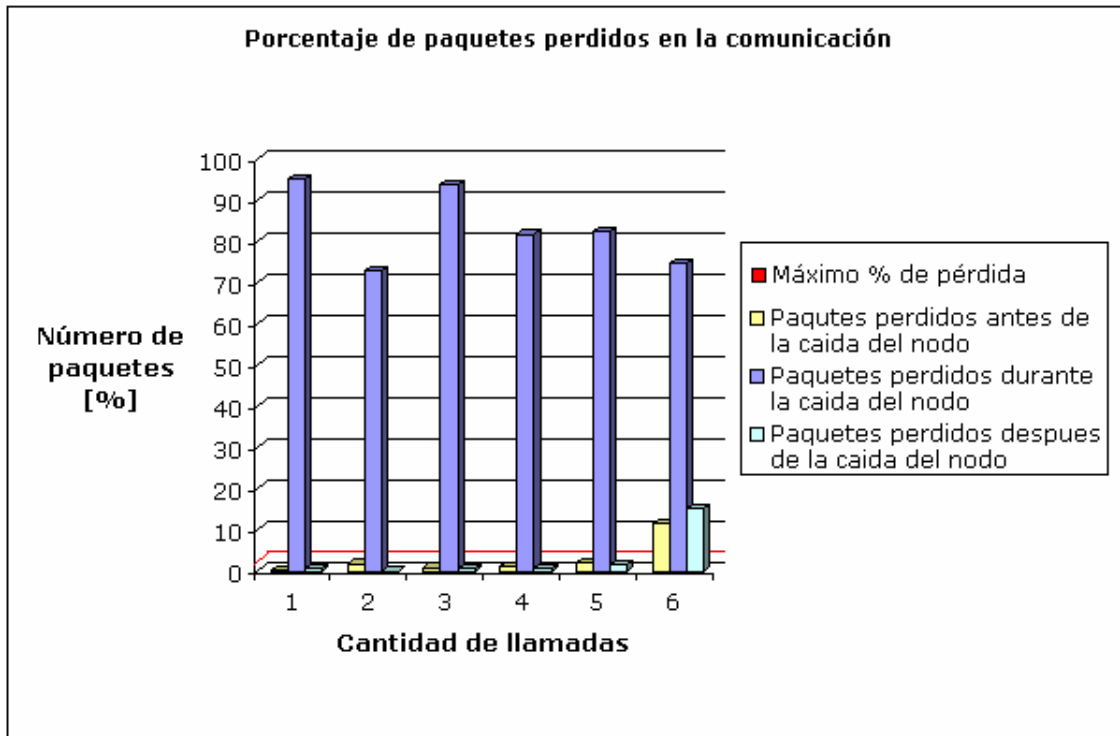


Figura 5-25. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud

Esta última prueba permite determinar la capacidad máxima de la red en las peores condiciones (nodos más lejanos), se observa que al igual que en el anterior escenario el tiempo de reestablecimiento del nodo es crítico para el mantenimiento de la llamada por lo cual es necesario realizar un nuevo intento de llamada después de unos segundos. Es interesante observar que para este caso el tiempo de reestablecimiento es mayor a medida que aumenta el número de llamadas y particularmente se encontró que la capacidad de la red disminuye en una llamada con respecto a la prueba anterior (sección 5.7.3.1) por las mismas razones expuestas en el escenario de la sección 5.7.2.2.

Con la implementación, simulación y evaluación de los tres escenarios planteados se comprueba en primer lugar, que la tecnología de red inalámbrica en malla presenta un funcionamiento correcto para la generación de llamadas en ambientes con múltiples obstrucciones como las de un entorno rural. Además se observa, que la capacidad máxima de la red varía de acuerdo a los diferentes eventos que ocurren en la red, pero en ninguno de estos escenarios la red se ve afectada totalmente y en el peor de los casos por lo menos 4 de los 8 puestos de salud pueden mantener una comunicación al mismo tiempo.

CONCLUSIONES

- Las redes inalámbricas en malla constituyen una de las mejores soluciones para la comunicación de sitios distantes, puesto que sus características de robustez, escalabilidad, flexibilidad, auto configuración y auto regeneración aportan múltiples beneficios en la implementación de sistemas de comunicación de entornos apartados que generalmente imponen restricciones de costo, alcance, disponibilidad, redundancia y flexibilidad en sus implementaciones.
- Dado que la arquitectura de las WMNs impone el uso de múltiples nodos que retransmitan la información entre si, es necesario diseñar redes con tecnologías livianas que no generen gran sobrecarga de procesamiento en cada uno de los dispositivos y de esta manera garantizar que el desempeño total del sistema sea adecuado; para tal fin, es importante identificar el nivel de movilidad que presenta cada uno de los nodos de la red, el cual tiene una relación directa con el tipo de protocolo de enrutamiento implementado, así, en cuanto menor sea la movilidad de los nodos es posible adoptar algoritmos de enrutamiento menos complejos que no sobrecargan a los dispositivos y por tanto permiten realizar un enrutamiento más rápido de la información.
- Debido a que la tecnología de las redes inalámbricas en malla fijas está compuesta por dispositivos de nivel 2, es posible realizar enrutamiento a este nivel a partir del conocimiento de las direcciones IP del destino y su posterior resolución a la dirección MAC por medio del protocolo ARP. Así, las tablas de enrutamiento en cada dispositivo se crean con las direcciones MAC de cada nodo presente en la red.
- La VoWLAN es uno de los servicios con mayor demanda y proyección en el mercado, sin embargo, en el momento de su implementación es importante tener en cuenta ciertos aspectos que determinan la calidad en la transmisión de voz, entre estos se encuentran la escogencia de un codec adecuado que no consuma gran ancho de banda ni genere mayor carga de procesamiento en la red, en cuanto a los retardos, es necesario realizar un diseño que introduzca el menor número de retardos en la red y posteriormente verificar que cada una de las comunicaciones entre los nodos esté dentro de los límites permitidos. Según los resultados obtenidos en la sección 5.7 el factor que más afecta al retardo de la comunicación es la caída y reestablecimiento de un nodo, mientras que la cantidad de saltos en la comunicación no presenta mayor incidencia y mantiene los niveles de calidad de la voz dentro de los límites indicados para el manejo de VoIP en una WLAN.
- El proceso de estandarización de la tecnología de las redes inalámbricas en malla para áreas personales, locales o metropolitanas, que se adelanta por los grupos de trabajo del IEEE, es de suma importancia para la generación de soluciones eficaces e interoperables que coincidan con la demanda del mercado y los requisitos de cada entorno, y generen mayores beneficios a los usuarios tanto a nivel técnico, como económico, industrial, político y social.
- La mejor opción para la implementación de una red inalámbrica en malla para el transporte de VoIP en un entorno rural de Colombia, es la tecnología IEEE 802.11x puesto que presenta mayores ventajas en cuanto a costos, simplicidad, flexibilidad, presencia en el mercado, calidad de servicio, seguridad y desarrollo.
- Pese a que las tecnologías 802.15.4 y 802.16 implementan una operación de malla en sus dispositivos, existen aún muchas falencias que no permiten su funcionamiento correcto y despliegue total. Por otro lado, la tecnología 802.15.4 se dirige hacia un tipo de mercado diferente enfocado hacia los sistemas de control industrial que requiere de capacidades más bajas de ancho de banda y alcance y la tecnología 802.16 no se encuentra muy difundida en el mercado lo cual aumenta significativamente los costos de implementación.
- Antes de implementar cualquier tipo de solución tecnológica es necesario identificar el tipo de servicio que se desea suministrar y las restricciones que impone el escenario sobre el cual se actúa. Este proyecto en particular presenta una serie de recomendaciones y pautas para diseñar redes inalámbricas en malla fijas que suministren el servicio de VoIP en entornos rurales, teniendo en cuenta los aspectos técnicos, económicos, políticos y demográficos que se presentan en estos ambientes. Los criterios definidos se convierten en un aporte valioso para orientar soluciones efectivas que conlleven a satisfacer las necesidades de conectividad de entornos apartados.

- El diseño de una red inalámbrica en malla aplicada a una de las microredes del proyecto EHAS-Silvia, siguiendo los criterios entregados en este proyecto, permitió validar la efectividad de estos, y generar otra propuesta de interconexión que mejora las condiciones actuales del servicio, gracias al reemplazo de la tecnología de VHF por Wi-Fi, al aumento de la cobertura por medio de múltiples saltos, a la implementación de redundancia en cada nodo y al incremento de la disponibilidad y facilidad de mantenimiento en la red. El modelo planteado permite identificar cada uno de los componentes que debe tener una WMN aplicada a un entorno rural y muestra un estimado de costos de implementación que se ajusta a la capacidad de pago de estas zonas, por lo tanto, sirve como base para posteriores implementaciones que busquen los mismos objetivos planteados en este proyecto.
- La simulación es una herramienta ideal para el estudio y verificación del comportamiento dinámico de algoritmos, protocolos y aplicaciones ante la imposibilidad de construirlos o adquirirlos. Además, permite estudiar los parámetros, propiedades y funcionamiento de los sistemas, de manera más sencilla y económica comparada con una implementación real; y determinar la conveniencia de una tecnología para un fin en particular.
- La herramienta NCTUns 3.0 se seleccionó para la simulación del diseño obtenido ya que demostró ser una herramienta muy útil y versátil para la simulación de redes. Además, contiene una interfaz gráfica muy intuitiva, facilita el desarrollo de los diseños de red, configuración y adaptación de los mismos, e implementa múltiples herramientas para el análisis de todas las fases de estudio de un sistema, incluyendo diseño, simulación y recolección de datos.
- La aplicación de una metodología de simulación es importante porque permite definir de forma clara los objetivos y alcances de un proyecto de simulación, requisitos indispensables para el desarrollo de modelos adecuados que conduzcan a la obtención de los resultados esperados. En particular la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones es adecuada para el modelamiento de sistemas de comunicaciones porque permite manejar la complejidad del sistema a través de la definición de bloques funcionales (objetos o componentes) fácilmente adaptables a entornos de simulación como los que se presentan en el simulador de redes NCTUns 3.0.
- Gracias a la flexibilidad y capacidad de la herramienta de simulación seleccionada que permite configurar parámetros característicos de las redes en malla como lo son el número de interfaces, el tipo de protocolo de enrutamiento, el direccionamiento de las redes, la implementación de aplicaciones para la generación de llamadas con diferentes codecs, entre otros, fue posible aproximarse en gran medida al comportamiento real de una red inalámbrica en malla y se logró identificar la capacidad de la red ante factores como la cantidad de saltos, el aumento de tráfico o la caída de nodos durante las llamadas, obteniendo valores que concuerdan con los resultados de redes reales y otros estudios que se han hecho al respecto.
- Para el análisis de la capacidad de la red se establecieron tres tipos de escenarios que simulan diferentes eventos que pueden presentarse en la red y generan fluctuaciones en el desempeño de la misma. Los resultados obtenidos permiten concluir lo siguiente:
 - En cuanto al número de saltos que soporta una llamada, pudo observarse que existe un incremento en los factores que determinan la calidad de la voz producido por el aumento de saltos, sin embargo, cuando se simula el número máximo de saltos presentes en la microred de San Carlos para la interconexión de dos puntos distantes, que corresponde a 7 saltos, los valores de retardo, *jitter* y pérdida de paquetes no superan los límites establecidos para una correcta conversación, por lo que se concluye que la WMN implementada es factible para la comunicación de todos los puestos de salud de la zona.
 - Para la realización de las pruebas del escenario de máxima cantidad de llamadas simultáneas fue necesario identificar los tipos de comunicación que pueden presentarse en la red de acuerdo a los procesos administrativos que realizan los puestos de salud y el hospital central. En este sentido, se determinó la necesidad de evaluar el comportamiento de la red cuando se realizan llamadas simultáneas desde los puestos de salud hacia el hospital de San Carlos, que es el tipo de comunicación más común y adicionalmente evaluar la comunicación simultánea entre diferentes puestos de salud, que aunque no es un requisito necesario del actual sistema de comunicación puede generar otros servicios adicionales a la red.

Para el caso de llamadas simultáneas desde los puestos de salud hacia el hospital de San Carlos se encontró que es posible comunicar 5 de los 8 puestos de salud al mismo tiempo, sin que los factores que determinan la calidad de la voz sobrepasen los límites aceptables. Estos resultados demuestran que a pesar de que la red debe realizar mayor procesamiento debido a la introducción de múltiples saltos en los caminos y al aumento en la competencia por el medio generada por la solicitud de comunicación de los 5 nodos, el desempeño de la red sigue siendo adecuado y permite que un buen porcentaje de los establecimientos puedan comunicarse a la vez, aunque es necesario precisar que esta situación no es muy frecuente.

Los resultados de llamadas simultáneas entre diferentes puestos de salud evidencian la incidencia de factores como el aumento de tráfico en la red, distancias entre los puntos y necesidad de pasar por varios saltos sobre la comunicación efectiva de los establecimientos, encontrándose que cuando las llamadas se realizan entre los puntos más lejanos es posible realizar 4 llamadas simultáneamente, lo que equivale a comunicar la totalidad de los puestos de salud presentes en la microrred de San Carlos. Mientras que si las llamadas se realizan entre puntos más cercanos se logra realizar 6 llamadas al tiempo lo que significa que 12 establecimientos podrían comunicarse a la vez.

- Finalmente, se evaluó el comportamiento de la red ante la caída de un nodo cuando se realizan varias llamadas simultáneas y se encontró que tanto para el caso de llamadas simultáneas al hospital central como para el de llamadas entre los puestos de salud, la falla de un nodo representa la desconexión de la comunicación de VoIP pues aunque existe un protocolo de enrutamiento que busca una ruta alterna para retransmitir los datos, el tiempo de reestablecimiento del camino es de aproximadamente 30 segundos que no son aptos para mantener la comunicación constante de una llamada. No obstante, este resultado mejora los niveles de disponibilidad de la red con respecto al sistema actual, pues en este último la falla del nodo representa la suspensión total de la comunicación hasta que el personal técnico solucione el problema, lo cual puede tardar varios días.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta las características y capacidades del NCTUns 3.0, se observa que con este simulador se podrían realizar estudios de múltiples tipos de redes (cableadas, inalámbricas y por satélite), por lo que se puede sugerir algún trabajo futuro que se enfoque enteramente a su utilización. También se considera muy beneficioso para la facultad difundir el uso de este simulador como herramienta educativa, ya que es muy completa, gratuita, y además contiene muchos temas que se tratan en el transcurso de la carrera. Esto sería un gran complemento, que permitiría lograr una mejor formación en términos conceptuales.

Con base en los estudios realizados y los resultados obtenidos se demuestra la necesidad de continuar las tareas de investigación y desarrollo en esta área de las telecomunicaciones, enfocándose en la aplicación de calidad de servicio a las WMNs, pues hasta el momento no se han realizado estudios de este tipo y resultaría muy interesante observar la capacidad de la red al transportar voz manejando criterios de QoS, pues los factores que afectan la calidad de la voz se minimizarían y por lo tanto la capacidad de llamadas aumentaría.

En este trabajo se analizó y verificó la efectividad que tiene el transporte de VoIP sobre WMNs fijas, sin embargo, un análisis profundo sobre éste mismo servicio pero sobre WMNs móviles se debe considerar para un trabajo futuro, pues es importante estudiar el comportamiento que tiene la voz en redes donde la topología cambia con mucha frecuencia.

Por último, se considera que un análisis y evaluación del transporte de VoIP sobre redes inalámbricas en malla en un ambiente real, con equipos de bajo costo y *firmware* abierto, que permitan implementar y probar nuevos protocolos de enrutamiento y además modificar ciertos parámetros para alcanzar mayores distancias, serviría para corroborar algunos de los resultados aquí obtenidos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Montiel. "Simulación de un transmisor OFDM basado en el estándar IEEE 802.11a". Valencia, Noviembre de 2005. Disponible en: <<http://alejovzla.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/tesis corregida.pdf>>
- [2] V. Valls. "Diseño de protocolos MAC para redes ad-hoc utilizando antenas direccionales inteligentes". Universidad Politécnica de Cataluña, Septiembre de 2005. Disponible en: <<http://biblioteca.upc.es/PFC/arxiu/migrats/40798-2.pdf>>
- [3] "Creación de un mundo inalámbrico con la tecnología de red en malla". Revista Technology@ Intel. Disponible en: <<http://www.intel.com/espanol/technology/magazine/archive/2003/dec/nc11032.pdf>>
- [4] X. Tao, T Kunz, D Falconer. "Traffic Balancing in wireless MESH networks". Disponible en: <http://www.sce.carleton.ca/~xiaojing/Traffic_Balancing_in_wireless_MESH_networks.pdf>
- [5] D. Beyer. "Wireless Mesh Networks for Residential Broadband". National Wireless Engineering Conference, San Diego, Noviembre de 2002. Disponible en: <http://www.iec.org/events/2002/natlwireless_nov/featured/tf2_beyer.pdf>
- [6] I Akyildiz, X. Wang, W. Wang. "Wireless mesh networks: a survey". Laboratorio del Colegio de Ingeniería Eléctrica y de Computación del Instituto de Tecnología de Georgia, Atlanta, Enero de 2005. Disponible en: <<http://www.eng.uci.ac.cy/toumpis/courses/ECE453/papers/mesh2.pdf>>
- [7] Strix Systems. "Solving the wireless mesh Multi-Hop Dilemma". Disponible en: <http://strixsystems.com/products/datasheets/StrixWhitepaper_Multihop.pdf>
- [8] Strix Systems. "Delivering VoIp over wireless mesh network". Disponible en: <<http://www.strixsystems.com/downloads/DeliveringVoIPOverMesh.pdf>>
- [9] F. Ros. "Evaluación de Propuestas de Interconexión a Internet para Redes Móviles Ad Hoc Híbridas". Universidad de Murcia. Diciembre de 2004. Disponible en: <<http://masimum.dif.um.es/fjrm/downloads/pfc-fjrm.pdf>>
- [10] T. Clausen, P. Jacquet. "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626". Octubre de 2003. Disponible en: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>>
- [11] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis. "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). RFC 3684". Febrero de 2004. Disponible en: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>>
- [12] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das. "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561". Julio de 2003. Disponible en: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>>
- [13] D. Johnson, D. Maltz, Y. Hu. "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)". Julio de 2004. Disponible en: <<http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>>
- [14] IEEE TGs. "Joint SEE-Mesh/Wi-Mesh Proposal to 802.11 TGs". IEEE 2006. Disponible en: <<http://www.802wirelessworld.com>>
- [15] D. Maniezzo, G. Villa, M. Gerla. "A 'Smart' MAC-Routing Protocol for WLAN Mesh Networks". Departamento de Ciencia y Computación de la Universidad de California, Los Angeles, California, U.S.A. Octubre de 2004. Disponible en: <http://www.cs.ucla.edu/ST/docs/tech_rep2004.pdf>
- [16] "Spanning tree". Wikipedia Enciclopedia. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Spanning_tree>

-
- [17] "Spanning tree protocol". Disponible en: <<http://educnet.decom-uv.cl/educnet/uploads/Sapanning%20Tree.pdf?nombre=p183/Sapanning%20Tree.pdf>>
- [18] Monografías. "El Estándar VoIP, redes y servicios de banda ancha". Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos33/estandar-voip/estandar-voip.shtml>>
- [19] R. De Salazar. "Sistema de voz sobre IP para redes inalámbricas en zonas rurales aisladas". Departamento de Ingeniería y Sistemas Telemáticos de la Universidad Politécnica de Madrid, Mayo de 2005.
- [20] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, E. Schooler. "Session Initiation Protocol, RFC 3261". Disponible en: <<http://rfc.net/rfc3261.html>>
- [21] M. Handley, V. Jacobson. "Session Description Protocol, RFC 2327". Disponible en: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc2327.txt>>
- [22] H. Schulzrinne, R. Frederick, V. Jacobson. "Protocol for Real Time Applications, RFC 3550". Disponible en: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>>
- [23] "Informe esencial sobre telefonía por el protocolo Internet". Grupo de Expertos sobre Telefonía IP del UIT-D. Disponible en: <http://www.itu.int/ITU-D/e-strategy/publications-articles/pdf/IP-tel_report-es.pdf>
- [24] P. Struhsaker. "Including VoIP over WLAN in a Seamless Next-Generation Wireless Environment". Disponible en: <http://focus.ti.com/pdfs/vf/bband/bband_80211_wp_voipoverwlan.pdf>
- [25] M. Dulcey, A. Holguín. "Diseño de la red de comunicaciones EHAS-Pacífico. Sub-Programa EHAS-Colombia". Universidad del Cauca. Disponible en: <<http://git.ucauca.edu.co/ehas/>>
- [26] T. Szigeti, C. Hattingh. "Quality of Service Design Overview". Disponible en: <<http://www.informit.com/articles/article.asp?p=357102&rl=1>>
- [27] G. Agredo, J. Gaviria. "Evaluación Experimental de la Capacidad de IEEE 802.11b para soporte de VoIP". Tecnologías convergentes aplicadas a la computación móvil. Memorias I2ComM 2006. Págs 28 – 39.
- [28] "Quality of Service". VoIPForo - QoS. Disponible en: <<http://www.voipforo.com/QoS/QoSVoip.php>>
- [29] Recomendación ITU-T G.1010. "Quality of service and performance". Disponible en: <<http://ftp.tiaonline.org/tr-30/tr303/Public/0312%20Lake%20Buena%20Vista/G1010%20-%2011-01.doc>>
- [30] Fundación Auna. "Tecnologías y actividades de estandarización para la interconexión de Home Networks". Disponible en: <http://www.fundacionauna.com/areas/26_estudios/pdf/1.pdf>
- [31] "IEEE Std. 802.15.4, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)". IEEE, 2003. Disponible en: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>>
- [32] A. Bellido, J. Torres, J. Muñoz, D. Miñana, M. Madrid, J. Olmeda. "Redes Móviles y Redes Inalámbricas". Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: <http://personales.alumno.upv.es/~jormuocu/trabajo_grupo.pdf>
- [33] "IEEE Std. 802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". IEEE, 1999. Disponible en: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>>

-
- [34] P. Brenner. "A technical tutorial on the IEEE 802.11 protocol". BreezeCOM. 1997. Disponible en: <http://sss-mag.com/pdf/802_11tut.pdf>
- [35] "Simple, Efficient and Extensible Mesh (SEE-Mesh) Proposal". Disponible en: <<http://www.csie.nctu.edu.tw/~yctseng/WirelessNet06-02/ieee802-11s-see-1.ppt>>
- [36] "Wi-Mesh Proposal for IEEE 802.11s". Disponible en: <<http://www.wi-mesh.org/>>
- [37] "IEEE Std. 802.16, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems". IEEE, 2004. Disponible en: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2004.pdf>>
- [38] A. Montoya, J. Ortega. "Criterios para interconexion de sitios remotos bajo los estandares ieee 802.11 y 802.16". Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, 2005.
- [39] R. Hincapié, R. Bustamante. "Análisis, modelamiento y simulación de redes enmalladas basadas en el estándar 802.16-2004". Revista "SISTEMAS & TELEMÁTICA" Universidad ICESI (2005)
- [40] C. Segura, A. Verdejo. "Análisis de la complejidad de algoritmos y problemas". Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <<http://www.fdi.ucm.es/profesor/rdelvado/Docencia/Docencia2005-2006/Los%20Or%C3%ADgenes%20de%20La%20Inform%C3%A1tica%20en%20la%20Historia%20de%20las%20Matem%C3%A1ticas/complejidad.pdf>>
- [41] J. Mañas. "Análisis de Algoritmos: Complejidad". Noviembre de 1997. Disponible en: <<http://www.lab.dit.upm.es/~lprg/material/apuntes/o/index.html#s5>>
- [42] A. Kumar, D. Manjunath, and J. Kuri. "Communication networking: an analytical approach". Amsterdam; Boston: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2004.
- [43] G. N. Higginbottom. "Performance evaluation of communication networks". Boston: Artech House, 1998.
- [44] Ember. Disponible en: <<http://www.ember.com/products/index.html>>
- [45] Crossbow Technology. Disponible en: <http://www.xbow.com/Products/new_product_overview.htm>
- [46] Helicomm Wireless Solutions. Disponible en: <<http://www.helicomm.com/?page=13-15&id=87>>
- [47] MeshNetics by Luxoft Labs. Disponible en: <<http://www.meshnetics.com/ZigBee-products/>>
- [48] Ubiwave. Disponible en: <<http://www.ubiwave.com/pages/solutions/meshnetwork.aspx>>
- [49] Airbee Wireless. Disponible en: <http://www.airbeewireless.com/Prod_desc.aspx?FID=26&ProductId=6#>
- [50] Freescale Semiconductor. Disponible en: <<http://www.freescale.com/>>
- [51] D.A. Maltz, J. Broch, D.B. Johnson. "Lessons from a fullscale multihop wireless ad hoc network testbed". IEEE Personal Communications 8 (2001) 8–15.
- [52] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, G. Judd, R. Morris. "Link-level measurements from an 802.11b mesh network". ACM Annual Conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM), Agosto de 2004. Págs. 121–131.
- [53] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, D.S.J. De Couto, R. Morris. "MIT Roofnet Implementation". Disponible en: <<http://pdos.lcs.mit.edu/roofnet/design/>>

-
- [54] A. Raniwala, K. Gopalan, T. Chiueh. "Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks". ACM Mobile Computing and Communications Review 8 (2) 2003.
- [55] UCSD mesh networks testbed. Disponible en: <<http://www.calit2.net/>>
- [56] "Wireless Mesh Networks". BWN lab wireless mesh networks research project. Disponible en: <<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/mesh/>>
- [57] "Enhance Public Safety and Productivity with Outdoor Wireless Networks". Disponible en: <http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns621/networking_solutions_package.html>
- [58] MeshNetworks Inc. Scalable routing technology. Disponible en: <http://www.meshnetworks.com/pages/technology/msr_atp_overview.htm>
- [59] Intel Mesh Networks Demonstrations. Disponible en: <http://www.intel.com/idf/us/fall2003/presentations/F03USWNTS116_OS.pdf>
- [60] Nortel Mesh Networks. Disponible en: <<http://www.nortelnetworks.com/solutions/wrlsmesh/index.html>>
- [61] Tropos Networks. Disponible en: <<http://www.tropos.com/technology/whitepaper.shtml>>
- [62] Strix Systems. Disponible en: <<http://www.strixsystems.com/>>
- [63] BelAir Networks. Disponible en: <<http://www.belairnetworks.com/>>
- [64] Microsoft Mesh Networks. Disponible en: <<http://research.microsoft.com/mesh/>>
- [65] MeshCube. Disponible en: <<http://www.meshcube.org/meshwiki/FrontPage>>
- [66] MeshNode. Disponible en: <<http://www.meshnode.org/>>
- [67] Locustworld. Disponible en: <<http://www.locustworld.com/>>
- [68] Quagga Routing Suite. Disponible en: <<http://www.quagga.net/>>
- [69] Champaign Urbana Community Wireless Network (CUWiN). Disponible en: <<http://cuwireless.net/>>
- [70] Pebble Linux. Disponible en: <<http://www.nycwireless.net/pebble>>
- [71] Openwrt. Disponible en: <<http://openwrt.org/>>
- [72] Freifunk Firmware. Disponible en: <<http://freifunk.net/wiki/FreifunkFirmwareEspanol>>
- [73] H. Wei, S. Ganguly, R. Izmailov, Z. Haas. "Interference-Aware IEEE 802.16 WiMax Mesh Networks". 61st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2005 Spring), Mayo de 2005.
- [74] J. Tao, F. Liu, Z. Zeng, Z. Lin. "Throughput Enhancement in WiMax Mesh Networks Using Concurrent Transmission".
- [75] Ministerio de Comunicaciones, República de Colombia. "Resolución 689 del 21 de abril de 2004". Disponible en: <http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/normatividad/2004/Resolucion/R00689d2004.pdf>
- [76] J. Mayné. "IEEE 802.15.4 y ZigBee". Silica. Octubre de 2004. Disponible en: <http://www.bairesrobotics.com.ar/data/IEEE_ZIGBEE_SILICA.pdf>

-
- [77] P. Osuna. "Redes 'Mesh' Wi-Fi de Bajo Coste, Desarrollo de un router inalámbrico solar autónomo". Universidad Politécnica de Madrid, Julio de 2006. Disponible en: <<http://www.ehas.org/prp/routersolar/descargas>>
- [78] J. Dickman, K. Rath, L. Kotecha. "Proposal for 802.16 Connection Oriented Mesh". IEEE 802.16 Standard Proposal, Marzo de 2003.
- [79] F. Simó. "Redes inalámbricas ad hoc con QoS en entornos rurales aislados". EHAS/GBT – ETSI de Telecomunicación.
- [80] R. de Salazar. "Sistema de voz sobre IP para redes inalámbricas en zonas rurales aisladas". Universidad Politécnica de Madrid, Mayo de 2005.
- [81] EHAS - Enlace Hispano Americano de Salud. Disponible en: <<http://www.ehas.org>>
- [82] "Infraestructura y servicios de telemedicina rural en el Departamento del Cauca, Colombia". Sub-Programa EHAS-Colombia. Universidad del Cauca. Disponible en: <<http://git.ucauca.edu.co/ehas/>>
- [83] Radio Mobile, Freeware by VE2DBE V7.6.9. Disponible en: <<http://www.cplus.org/rmw/english1.html>>
- [84] Network Simulator 2. Disponible en: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns>>
- [85] The Network Simulator ns-2: Validation Tests. Disponible en: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-tests.html>>
- [86] Contributed Code NS2. Disponible en: <http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Contributed_Code>
- [87] NCTUns 3.0 Network Simulator and Emulator. Disponible en: <<http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>>