

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES 802.11P/WAVE EN LA TRANSMISIÓN
DE DATOS, VOZ Y VIDEO IP**



**Universidad
del Cauca**

**ANTONI GABRIEL CAICEDO BASTIDAS
JUAN MANUEL MARTÍNEZ OJEDA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías En Telecomunicaciones – GNTT
Línea de Investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
POPAYÁN
2011**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES 802.11P/WAVE EN LA TRANSMISIÓN
DE DATOS, VOZ Y VIDEO IP**

**ANTONI GABRIEL CAICEDO BASTIDAS
JUAN MANUEL MARTÍNEZ OJEDA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones**

**Director
GUEFRY AGREDO MÉNDEZ - M. Sc**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías En Telecomunicaciones – GNTT
Línea de Investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
POPAYÁN
2011**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PRINCIPIOS DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN VEHÍCULOS, VOIP Y VIDEO IP	4
1.1 NOCIONES GENERALES DE LAS REDES INALÁMBRICAS.....	4
1.1.1 Topologías en Redes Inalámbricas.....	6
1.2 DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA RED INALÁMBRICA AD HOC.....	9
1.2.1 Cobertura de una Red Ad Hoc.....	10
1.2.2 Riesgos en las Redes Inalámbricas.....	11
1.3 PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN REDES MANET.....	12
1.3.1 Protocolos Proactivos.....	13
1.3.2 Protocolos Reactivos.....	13
1.3.3 Protocolos Híbridos.....	13
1.3.4 Protocolos Geográficos.....	14
1.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES MANET.....	15
1.4.1 Libertad de Integración.....	15
1.4.2 Optimización Automática de Rutas.....	15
1.4.3 Red de Múltiples Saltos.....	15
1.4.4 Fácil Adaptación.....	16
1.4.5 Ancho de Banda Autosuficiente.....	16
1.4.6 Robustez y Efectividad.....	17
1.4.7 Escalabilidad.....	18
1.4.8 Autonomía.....	18
1.4.9 Control Distribuido.....	19
1.4.10 Bajo Requerimiento de Energía.....	19
1.5 APLICACIONES DE LAS REDES MANET.....	19
1.5.1 Redes Residenciales.....	19
1.5.2 Redes Comerciales Empresariales.....	19

1.5.3	Redes en Situación de Emergencia.....	20
1.5.4	Redes Militares.....	20
1.5.5	Sistemas de Control y Monitoreo de Tráfico	21
1.5.6	Red de Sensores.....	22
1.5.7	Redes Vehiculares	22
1.6	DIFERENCIAS ENTRE REDES MANET Y MESH	22
1.7	VOZ IP EN REDES INALÁMBRICAS	23
1.7.1	La VoIP	24
1.7.2	Compresión de Voz	25
1.7.3	Protocolos de la VoIP	28
1.8	VIDEO IP EN REDES INALÁMBRICAS.....	29
1.8.1	El Video IP.....	29
1.8.2	Compresión de Video	30
1.9	PROTOCOLOS COMUNES DE AUDIO Y VIDEO	32
1.9.1	Protocolo de Inicio de Sesión	32
1.9.2	RTP/RTCP	32
1.9.3	Encapsulamiento de Voz y/o Video IP	33
2.	LAS VANETS, ANÁLISIS BAJO LA NORMA 802.11p Y SU COMPARACIÓN CON EL ESTÁNDAR ORIGINAL	35
2.1	SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE.....	35
2.1.1	Los ITS en la Carretera	36
2.1.2	ITS, Investigación y Desarrollo	39
2.2	VANETS	40
2.3	ESTÁNDAR IEEE 802.11	42
2.4	ESTÁNDAR IEEE 802.11p/WAVE.....	44
2.4.1	WAVE.....	45
2.4.2	IEEE 802.11p	50
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	60
3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	60

3.2	MOTIVACIÓN Y APLICACIÓN	61
3.3	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.....	61
3.4	ESPECIFICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	63
3.4.1	Transmisión de Datos, Voz y Video Ad Hoc pura entre vehículos utilizando estándar 802.11p.....	65
3.4.2	Análisis de los parámetros de velocidad y cobertura en 802.11p.....	67
3.4.3	Análisis en Escenario Urbano, Prueba 1: Transmisión de datos pura entre Vehículo e Infraestructura.....	68
3.4.4	Análisis en Escenario Urbano, Prueba 2: Transmisión de Voz pura entre vehículo e infraestructura.....	70
3.4.5	Análisis en Escenario Urbano, Prueba 3: Transmisión de Video pura entre vehículo e infraestructura.....	71
3.4.6	Análisis en Escenario Urbano, Prueba 4: Transmisión de videoconferencia (Voz, Video IP y Datos), entre vehículo e infraestructura.....	71
3.5	INDICADORES DE RENDIMIENTO DE RED.....	72
	• Throughput [].....	72
	• Pérdida de paquetes	73
	• Retardo	73
4.	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
4.1	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE VELOCIDAD Y COBERTURA EN 802.11P.....	74
4.1.1	Sub-escenario 1: Influencia de la velocidad.....	74
4.1.2	Sub-escenario 2: Rango de Cobertura	76
4.2	ANÁLISIS ESCENARIO URBANO, PRUEBA 1: TRANSMISIÓN DE DATOS PURA ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.....	77
4.2.1	Sub-escenario 1: Enlace Punto a Punto	78
4.2.2	Sub-escenario 2: Punto Multipunto.....	78
4.3	ANÁLISIS ESCENARIO URBANO, PRUEBA 2: TRANSMISIÓN DE VOZ PURA ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.....	80
4.3.1	Sub-escenario 1: Transmisión punto a punto con códec G.711	80

4.3.2	Sub-escenario 2: Transmisión Punto - Multipunto con códec G.711	80
4.3.3	Sub-escenario 3: Transmisión Punto a Punto con códec G.729	82
4.3.4	Sub-escenario 4: Transmisión Punto – Multipunto con códec G.729	82
4.4	ANÁLISIS ESCENARIO URBANO, PRUEBA 3: TRANSMISIÓN DE VIDEO IP PURA ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.	84
4.4.1	Sub-escenario 1: Transmisión punto a punto de Video IP	85
4.4.2	Sub-escenario 2: Transmisión punto multipunto de Video IP	86
4.5	ANÁLISIS DEL ESCENARIO URBANO, PRUEBA 4: TRANSMISIÓN DE VIDEOCONFERENCIA (VOZ, VIDEO IP y DATOS), ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.	87
4.5.1	Sub-escenario 1: Sin calidad del servicio.....	87
4.5.2	Sub-escenario 2: Con calidad del servicio	87
4.6	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN EN EL DESEMPEÑO CUANDO EXISTE CAMBIO DE CELDA (<i>HANDOVER</i>) ENTRE 802.11b Y 802.11p.	89
4.6.1	Sub-escenario 1, Handover en 802.11b.	89
4.6.2	Sub-escenario 2, Handover en 802.11p.	90
5.	CONCLUSIONES.....	92
6.	RECOMENDACIONES.....	95
7.	REFERENCIAS.....	96
ANEXOS		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Elementos básicos de un WLAN 1.....	5
Figura 1-2 Elementos básicos de una WAVE	6
Figura 1-3 Red inalámbrica en modo de infraestructura.....	7
Figura 1-4 Red inalámbrica en topología Ad Hoc.....	8
Figura 1-5 Flexibilidad de la red Ad Hoc frente a obstáculos	11
Figura 1-6 Localización de destino según datos geográficos	14
Figura 1-7 Transmisión de Datos Estable en rutas con saltos Cortos.	17
Figura 1-8 Redundancia, Estabilidad y Confiabilidad de la Red Auto configurable.....	18
Figura 1-9 Interconexión entre organismos de Emergencia.	20
Figura 1-10 Las Redes MANET utilizadas bajo demanda en escenarios complejos.	21
Figura 1-11 Sistema de compresión G.729.....	25
Figura 1-12 Códec G.711	26
Figura 1-13 Códec G.729.	27
Figura 1-14 Paquetes RTP y RTCP para el control de la calidad en recepción.....	33
Figura 1-15 Encapsulamiento a nivel 2 de un paquete de Voz y/o Video IP.....	34
Figura 2-1 Sistema ITS en Carretera.	38
Figura 2-2 Ejemplo de Entorno Vehicular	42
Figura 2-3 Ejemplo de Arquitectura Exterior del OBU.	45
Figura 2-4 Visión General de la Pila de Protocolos WAVE.....	46
Figura 2-5 Especificaciones de IEEE 1609.1	48
Figura 2-6 Estructura del Espectro en 802.11p.....	51
Figura 2-7 Supertrama en 802.11p	52
Figura 2-8 Ciclos de Transmisión en 802.11p.....	52
Figura 2-9 Configuración de Parámetros de backoff de IEEE 802.11p	54
Figura 2-10 Proceso de <i>Handover</i> en IEEE 802.11 a/b/g/n.....	56
Figura 3-1 Comunicación Ad Hoc pura entre vehículos 802.11p.....	66
Figura 3-2 Sub Escenario 1: Influencia de la Velocidad	67
Figura 3-3 Sub Escenario 2: Rango de Cobertura	68
Figura 3-4 Enlace Punto a Punto	69
Figura 3-5 Enlace Punto Multipunto	69

Figura 3-6 Simetría vial de una ciudad Colombiana (Referencia Popayán).....	70
Figura 3-7 Configuración de Grilla para <i>Handover</i>	72
Figura 4-1 Efectos de la Velocidad en 802.11p.....	75
Figura 4-2 Throughput Vs Velocidad y % de Pérdida de Paquetes Vs Velocidad en 802.11p.	75
Figura 4-3 Retardo Vs Velocidad en 802.11p.	75
Figura 4-4 Gráficas de Throughput Vs Cobertura y % de Pérdida de Paquetes Vs Cobertura en 802.11p.....	77
Figura 4-5 Gráfica de Retardo Vs Cobertura en 802.11p.....	77
Figura 4-6 Throughput Vs Tiempo en Enlace Punto a Punto.	78
Figura 4-7 Escenario Multicast.....	79
Figura 4-8 Throughput Vs No. de OBUs en un Enlace Punto Multipunto.	79
Figura 4-9 Throughput Vs Tiempo y Medición de Pérdida de Paquetes y Retardo en Enlace Punto a Punto de Voz con códec G711.	80
Figura 4-10 Throughput Vs Número de OBUs y Porcentaje de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G.711.....	81
Figura 4-11 Retardo Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G.711.....	82
Figura 4-12 Throughput Vs Tiempo y Medición de Pérdida de Paquetes y Retardo en Enlace Punto a Punto de Voz con códec G.729.....	82
Figura 4-13 Throughput Vs Número de OBUs y Porcentaje de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G.729.....	83
Figura 4-14 Retardo Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G729.....	83
Figura 4-15 Throughput Vs Tiempo, Medición de Pérdida de Paquetes y Retardo en Enlace Punto a Punto de Video IP.....	86
Figura 4-16 Throughput Vs Número de OBUs y Porcentaje de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Video IP.	86
Figura 4-17 Retardo Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Video IP.	87
Figura 4-18 Proceso de Handover con 802.11b.....	89
Figura 4-19 Proceso de Handover con 802.11p.....	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 Diferencias entre redes Manet y Mesh.....	23
Tabla 1-2 Códecs utilizados para VoIP	28
Tabla 2-1 IEEE802.11p Tasas de Transferencia.....	50
Tabla 2-2 Parámetros de configuración por defecto en IEEE 802.11p.....	55
Tabla 2-3 Parámetros de configuración por defecto para el CCH	55
Tabla 2-4 Parámetros de configuración por defecto para el SCH en IEEE 802.11p.....	55
Tabla 2-5 Comparación entre 802.11a y 802.11p.	58
Tabla 3-1 Ventajas y desventajas de NCTUns.....	62
Tabla 4-1 Voz, Video IP y Datos sin QoS y con transmisión simultánea.	87
Tabla 4-2 Voz, Video IP y Datos con QoS y con transmisión simultánea.....	87
Tabla 4-3 Medición de desempeño en proceso de <i>Handover</i> con 802.11b.....	89
Tabla 4-4 Medición de desempeño en proceso de Handover con 802.11p.....	90
Tabla 5-1 Número de OBUs por Celda.	92

LISTA DE ACRÓNIMOS

- ABR** Protocolo de Enrutamiento Basado en Asociación (*Associativity Based Routing Protocol*)
- ABS** Sistema de Frenado Anti-Bloqueo (*Anti-lock Braking System*)
- AC** Categorías de Acceso (*Access Categories*)
- ACK** Acuse de Recibo (*Acknowledgment*)
- ADPCM** Modulación por Codificación de Impulsos Diferencial Adaptativa (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*)
- ADV** Vector de Distancia Adaptativo (*Adaptative Distance Vector*)
- AES** Estándar Avanzado de Encriptación (*Advanced Encryption Standard*)
- AIFS** Espacio Inter-Trama Arbitrario (*Arbitration Interframe Space*)
- AIFSN** Número de Arbitramento de Espacio Inter-Trama (*Arbitration Interframe Space Number*)
- AODV** Vector Distancia Ad Hoc sobre Demanda (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*)
- AP** Punto de Acceso (*Access Point*)
- BE** Mejor Esfuerzo (*Best Effort*)
- BK** *Background*
- BPSK** Modulación de Cambio de Fase Binaria (*Binary Phase Shift Keying*)
- BSS** Conjunto Básico de Servicios (*Basic Service Set*)
- CCH** Canal de Control (*Control Chanel*)
- CCITT** Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (*International Consultative Committee for Telegraph and Telephone*)
- CNG** Generador de Ruido de Confort (*Comfort Noise Generation*)
- CSMA/CA** Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*)
- CSRC** Fuente de Contribución para RTP (*Contributing Source*)
- CTS** *Preparado para Enviar* (*Clear To Send*)
- CW** Ventana de Contienda (*Contention Window*)
- CWmax** Ventana de Contienda Máxima (*Contention Window maximum*)
- CWmin** Ventana de Contienda Mínima (*Contention Window manimum*)
- DCF** Función de Coordinación Distribuida (*Distributed Coordination Function*)
- DIFS** Distribución Espacial Inter-Trama (*Distributed Interframe Space*)
- DSR** Enrutamiento de Fuente Dinámico (*Dynamic Source Routing*)
- DSDV** Destino Secuenciado por Vector de Distancia (*Destination Sequenced Distance Vector*)
- DSRC** Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (*Dedicated Short Range Communications*)
- DSSS** Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*)

DSVD Voz y Datos Simultáneos Digitales (*Digital Simultaneous Voice and Data*)

DTX Transmisión Discontinua (*Discontinuous Transmission*)

DVD Disco Versátil Digital (*Digital Versatile Disc*)

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

ESP Control Electrónico de Estabilidad (*Electronic Stability Control*)

FCC Comisión Federal de Comunicaciones (*Federal Communications Commission*)

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

FH Salto en Frecuencia (*Frequency Hopping*)

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

FSR Protocolo de Estado Fisheye (*Fisheye State Protocol*)

FTP Protocolo de Transferencia de Archivos (*File Transfer Protocol*)

GIPS Sonido IP Global (*Global IP Sound*)

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

GSM Sistema Global para Comunicaciones Móviles (*Global System for Mobile Communications*)

HDTV Televisión de Alta Definición (*High Definition TV*)

HMI Interfaz Humano Máquina (*Human Machine Interface*)

HTTP Protocolo de Transferencia de Hipertexto (*Hypertext Transmission Protocol*)

IAX Intercambio entre Asterisk (*Inter Asterisk eXchange*)

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

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

IFS Espacio de Intertrama (*Interframe Space*)

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

IP Protocolo de Internet (*Internet Protocol*)

IPv6 Protocolo de Internet versión 6 (*Internet Protocol version 6*)

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

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

ITU-T Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector Telecomunicaciones (*International Telecommunications Union – Telecommunication*)

IVC Comunicación Inter-Vehicular (*Inter-Vehicle Communication*)

JPEG Grupo de Expertos Fotográficos Asociados (*Joint Photographic Experts Group*)

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

LAR Protocolo de Enrutamiento Asistido por Localización (*Location Aided Routing Protocol*)

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

LLC Control de Enlace Lógico (*Logical Link Control*)

LOS Line of Sight (*Línea de Vista*)

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

MANET Red Ad Hoc Móvil (*Mobile Ad Hoc Network*)

MGCP Protocolo de Control de Pasarelas hacia el Medio (*Media Gateway Control Protocol*)

MOS Nota Media de Opinión (*Mean Opinion Score*)

NM Nodos Móviles (*Mobile Nodes*)

OBE Equipamiento de Abordo (*On-Board Equipment*),

OBU Unidad de Abordo (*On Board Unit*)

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

OLSR Enrutamiento Optimizado del Estado del Enlace (*Optimized Link State Routing*)

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

P2P Igual a Igual (*Peer to Peer*)

PDA Asistente Digital Personal (*Personal Digital Assistant*)

PCM Modulación por Pulsos Codificados (*Pulse Code Modulation*)

PHY Capa Física (*Physical Layer*)

PSOBU Unidad de Seguridad Pública de Abordo (*Public Security On Board Unit*)

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*)

RCP Procesador de Comandos de Recursos (*Resources Commands Processor*)

RM Administrador de Recursos (*Resources Manager*)

RMA Aplicaciones del Administrador de Recursos (*Resources Manager Application*)

RSU Unidad al Lado de la Carretera (*Road Side Unit*)

RTCP Protocolo de Control de RTP (*RTP Control Protocol*)

RTP Protocolo de Transporte en Tiempo Real (*Real Time Transport Protocol*)

RTS Solicitud de Envío (*Request To Send*)

SCCP Protocolo de Control de Cliente Ligero (*Skinny Client Control Protocol*)

SCH Canal de Servicio (*Service Channel*)

SDP Protocolo de Descripción de Sesión (*Session Description Protocol*)

SIFS Espacio Inter-Trama Corto (*Short Interframe Space*)

SIP Protocolo de Inicio de Sesión (*Session Initiation Protocol*)

SSID Identificador de Conjunto de Servicio (*Service Set Identifier*)

SSRC Fuente de Sincronización para RTP (*Synchronization Source*)

TC Categorías de Tráfico (*Traffic Categories*)

TCID Identificador de Categoría de Tráfico (*Traffic Category Identifier*)

TCP Protocolo de Control de Transmisión (*Transmission Control Protocol*)

TORA Algoritmo de Enrutamiento Ordenado Temporalmente (*Temporally Ordered Routing Algorithm*)

TXOP Oportunidad de Transmisión (*Transmission Opportunity*)

UDP Protocolo de Datagramas de Usuario (*User Datagram Protocol*)

UWB Ultra Ancho de Banda (*Ultra Wide Band*)

V2I Comunicaciones Vehículo Infraestructura (*Vehicle to Infrastructure*).

V2V Comunicaciones Vehículo a Vehículo (*Vehicle to Vehicle Communication*)

VANETS Redes Vehiculares (*Vehicular Ad Hoc Network*)

VAD Voice Activity Detection (*Detección de Actividad de Voz*)

VI Video

VO Voz

VOD Video por Demanda (*Video On Demand*)

VoIP Voz sobre IP (*Voice over IP*)

WAN Redes de Área Extensa (*Wide Area Network*)

WAVE Acceso Inalámbrico en el Entorno Vehicular (*Wireless Access in the Vehicular Environment*).

WBBS Conjunto Básico de Servicios WAVE (*WAVE Basic Service Set*)

Wi-Fi Alianza de Fidelidad Inalámbrica (*Wireless Fidelity Alliance*)

WiMAX Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)

WLAN Redes inalámbricas de Área Local (*Wireless Local Area Network*)

WPAN Redes Inalámbricas de Área Personal (*Wireless Personal Area Network*)

WRP Protocolo de Enrutamiento Inalámbrico (*Wireless Routing Protocol*)

WSA Anuncio de Servicio WAVE (*WAVE Service Announcement*)

WSMP Protocolo de Mensaje Cortos WAVE (*WAVE Short Message Protocol*)

ZRT Protocolo de Enrutamiento por Zona (*Zone Routing Protocol*).

RESUMEN

En este documento se presenta el estudio de las redes inalámbricas bajo un entorno relativamente nuevo y en el que gradualmente se han ido descubriendo necesidades que anteriormente parecían no ser de gran importancia, denominado acceso inalámbrico en entornos vehiculares (redes vehiculares), el cual es presentado y estudiado bajo aspectos característicos, tales como: su arquitectura de red, tipos de configuración, escenarios de aplicación, posibles protocolos de enrutamiento y su capa MAC, lo cual permite: entender su funcionamiento, la manera como se implementa e identificar sus variaciones respecto del estándar original. Debido a esto se hace una evaluación del desempeño en la transmisión de Datos, Voz y Video IP, analizando algunos factores que se deben tener en cuenta para prestar servicios derivados con calidad aceptable, en este tipo de redes. La enmienda en la cual se soportan las redes vehiculares es la IEEE 802.11p, en la cual se centra el estudio en este Trabajo de Grado.

En cuanto a la valoración del desempeño del tráfico manejado en este trabajo: Datos, Voz y Video IP sobre las redes vehiculares, se efectuó empleando simulaciones realizadas en la Herramienta NCTUns versión 6.0, dentro de un escenario Vehículo – Infraestructura Vial, en las cuales se especifica el tipo de tráfico y el tamaño de la trama, entre otros. De tal manera, que se evalúa el comportamiento del tráfico en la red y se determina la viabilidad del uso de servicios de valor agregado bajo condiciones aceptables en este tipo de redes y se concluye que es posible realizar comunicaciones con servicios en tiempo real entre vehículos y la infraestructura, como se pudo comprobar en los escenarios simulados.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la tecnología, a través de las redes de telecomunicaciones, busca mejorar distintos entornos de la sociedad, sin embargo, aún hay áreas que no han sido consideradas o con servicios de red ineficientes; esto se debe a la falta de estudios, planteamientos erróneos o por simple desconocimiento de las características de cada contexto en particular, de ahí que este documento haga referencia a los entornos vehiculares que son áreas a considerar y se están estudiando para dar soluciones tecnológicas a los distintos problemas que estos tienen. Por lo cual el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ha venido desarrollando la adecuación de una solución con diferentes tecnologías y enfatiza en el desarrollo del estándar IEEE 802.11p también conocido como Acceso Inalámbrico para Entornos Vehiculares (WAVE, *Wireless Access in Vehicular Environments*).

Los sistemas de transporte inteligente (ITS, *Intelligent Transportation Systems*), se crean para aplicar las nuevas generaciones en tecnologías de telecomunicaciones, electrónica, informática, sensores y técnicas de procesamiento, almacenamiento y visualización de la información, a las carreteras y al transporte. Los tres elementos claves involucrados en los comienzos y evolución de los sistemas ITS, ya implantados con éxito y/o aún en fase de desarrollo, son: la información, las comunicaciones y la carretera [1]. El estándar asociado en este contexto es el IEEE 802.11p, el cual tiene la misión de definir las mejoras requeridas por el estándar IEEE 802.11 de manera que éste pueda utilizarse en sistemas de transporte ITS [2] y ser la base sobre la que se desarrollarán las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC, *Dedicated Short Range Communications*), el cual es otro proyecto de estandarización del IEEE impulsado por el ministerio de transporte de Estados Unidos y por un importante número de fabricantes de automóviles, cuyo objetivo es crear una red nacional de comunicaciones que permita el intercambio de información entre vehículos y la infraestructura vial¹ [3].

La integración de estas tecnologías innovadoras tiene como finalidad el mejoramiento de la eficiencia en el transporte, aumentar la seguridad vial, reducir la contaminación, optimizar los tiempos de desplazamiento y facilitar operaciones como el pago de peajes o la planificación de itinerarios, entre otras. Por lo tanto se busca revitalizar y ampliar los horizontes de un sector que genera muchos ingresos [4]. Para Colombia tiene aplicación en el marco de trabajo de organizaciones como la de la Fundación ITS Colombia cuyo objetivo principal es dar apoyo a las tecnologías innovadoras para el desarrollo del sistema de transporte en el territorio [5].

Las diferencias técnicas entre redes de telecomunicaciones fijas y móviles [6] [7], tales como el protocolo de acceso al medio, las tramas, los retardos, etc. requieren mayor atención para su implementación en entornos urbanos y viales. El diseño de una red de acceso inalámbrico para entornos vehiculares WAVE debe establecer una red con la

¹ El Escenario vehículo y la infraestructura vial hace referencia a la interconexión existente entre el equipamiento sobre el vehículo, y los dispositivos transmisores y receptores que existen y hacen parte de la red (celda) situada dentro del entorno circundante, que está montado en infraestructuras físicas (torres, paraderos, postes de energía, etc.) y son parte de la vía y que además son estáticas.

capacidad de soportar servicios de Datos, Voz y Video, además de ofrecer las características requeridas por el usuario.

La tendencia en el mundo es converger a una sola red de servicios que reduzca los costos que se generan cuando se utilizan infraestructuras separadas. Las comunicaciones inalámbricas en entornos vehiculares vislumbran un gran futuro gracias al buen desarrollo que se ha obtenido con las Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) en todo el mundo, por lo cual la implantación de servicios adicionales como Internet, voz y video, es un tema interesante que se debe atender para el desarrollo integral del entorno vehicular, pero es necesario hacer un estudio preliminar de las características de la tecnología, como 802.11p, debido a que en entornos vehiculares es desarrollada inicialmente para transmitir a baja velocidad, según [8].

La información de control que transporta estas redes, normalmente requiere bajas velocidades y poco tráfico de datos, pero la tecnología 802.11 en sí misma está definida para soportar velocidades que habilitan la transmisión de voz y video en las redes WAVE, por tanto la necesidad que se tiene es determinar desde la perspectiva de desempeño si este tipo de redes permiten cumplir con los límites de retardo y pérdida que se han establecido para que una comunicación sea viable. Dado que en caso de serlo, se podría tener una gama interesante de servicios para vehículos, brindando de manera conjunta datos informativos, conexión a Internet, voz y video a usuarios móviles cuando se utiliza 802.11p como esquema de referencia.

El estándar IEEE 802.11p o WAVE, ha generado grandes expectativas en la industria de las telecomunicaciones, se perfila como una excelente alternativa para el desarrollo de la seguridad, los negocios, el entretenimiento, etc. Este estándar está siendo impulsado por varias compañías fabricantes de automóviles quienes, desde el año 2008, equipan sus vehículos para interactuar con esta tecnología [9].

Es por lo anterior, que en el presente Trabajo de Grado se busca analizar la viabilidad de la transmisión de Datos, Voz y Video IP a través de redes WAVE basándose en el estudio del desempeño en la capa MAC, puesto, que normalmente una buena calidad de audio y/o video depende de elementos tales como el *throughput*², el retardo y la pérdidas de paquetes dentro del marco de trabajo de IEEE para la tecnología inalámbrica 802.11p. De este modo este Trabajo de Grado consta de cinco capítulos recopilados de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presentan conceptos sobre redes inalámbricas y se hace énfasis en las redes Ad Hoc Móviles como base para el surgimiento de las redes vehiculares. De esta manera se tendrá una visión general de las características de estas redes que también afectarán las redes vehiculares, objeto de este estudio. Además se tratan temas relacionados con: el procesamiento que requiere la Voz y el Video para que sean transmitidos, y los parámetros que entran en juego. También se estudian algunos principios de diseño de red que pueden aplicarse en las redes Móviles.

² Cantidad de datos transmitidos que contienen información útil y no redundante.

En el capítulo 2 se realiza una descripción de las redes vehiculares y de su aporte a los ITS, lo cual brindará una visión global del funcionamiento de este tipo de redes y los avances que se tienen en el estudio de esta temática. También se identifican y analizan los aspectos técnicos de la enmienda a nivel MAC y físico y se determinan las diferencias que existen con el estándar original y así mismo se analizan temas concernientes con el grupo de tecnologías que hacen parte de Wi-Fi (*Wireless Fidelity*).

En el capítulo 3 se organizan, exponen y justifican los diferentes escenarios de simulación, teniendo en cuenta los casos más relevantes presentes a la hora de implementar servicios de Datos, Voz y Video IP en las redes vehiculares, además se describen los parámetros que pueden afectar el desempeño de este tipo de redes y su comportamiento en un entorno simulado.

En el capítulo 4 se simulan los entornos propuestos y finalmente se valoran los resultados con redes simuladas y se extraen conclusiones sobre la viabilidad de la transmisión de Datos, Voz y Video IP sobre el uso de la tecnología WAVE en los entornos descritos y su aplicación en sistemas WLAN en específico lo relacionado con el estándar IEEE 802.11p.

En el capítulo 5 se dan las conclusiones y se brindan algunas recomendaciones.

1. PRINCIPIOS DE LAS REDES INALÁMBRICAS EN VEHÍCULOS, VOIP Y VIDEO IP

Este capítulo cubre distintos temas, con los cuales se introduce al lector en la temática a tratar y se ubica a éste en un entorno en particular; además, se fundamenta el interés que existe en cuanto a la determinación de las características requeridas para proporcionar servicios, que demandan ser adaptados y soportados en cuanto a capacidades de ancho de banda y que se ejecuten en tiempo real como la VoIP y el Video IP, así como las técnicas y los códec que permiten cumplir tales demandas; también se incluyen aspectos introductorios concernientes a tecnologías inalámbricas aplicadas al campo de las Redes Vehiculares, cómo es su arquitectura; y se hace un estudio general de las tecnologías preliminares que aporten a la comprensión del tema de este Trabajo de Grado.

1.1 NOCIONES GENERALES DE LAS REDES INALÁMBRICAS

Según [10] una Red Inalámbrica de Área Local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) se define como un tipo de red que utiliza como canal de transmisión el aire y que además es de pocos metros de alcance; su tasa de transferencia de información es en gran porcentaje alta (mayor o igual a 11 Mbps) con baja tasa de errores y administrada en forma privada, según el IEEE. Este tipo de redes prácticamente elimina las conexiones cableadas ya que hace uso de las ondas electromagnéticas para interconectar los distintos equipos y terminales móviles. Las redes inalámbricas de este tipo establecen e implementan enlaces básicamente con tecnologías de microondas, y lo más importante a nivel de usuario, es la posibilidad de movilizarse dentro de un área de cobertura sin perder conexión.

Las tecnologías inalámbricas posibilitan implementar sistemas flexibles y fácilmente escalables de comunicación, que pueden interactuar dentro de redes híbridas (cableada e inalámbrica), permitiendo crear distintas implementaciones en entornos con condiciones geográficas, de seguridad y económicas complejas.

Este tipo de redes ofrecen principalmente características como movilidad, flexibilidad en su arquitectura, menor costo en mantenimiento y escalabilidad, que permiten configurar gran variedad de topologías para satisfacer necesidades específicas. Sin embargo, estas redes también tienen inconvenientes como menor ancho de banda respecto a las redes cableadas, la dificultad de añadir seguridad y garantizar ciertos niveles de calidad de servicio (*Quality of Service*).

Los terminales o nodos de una red inalámbrica deben tener una interfaz, que sea la encargada de realizar las funciones del nivel físico y de enlace de datos, 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. En la figura 1-1[11] se muestra los elementos básicos para la implementación de una red inalámbrica.

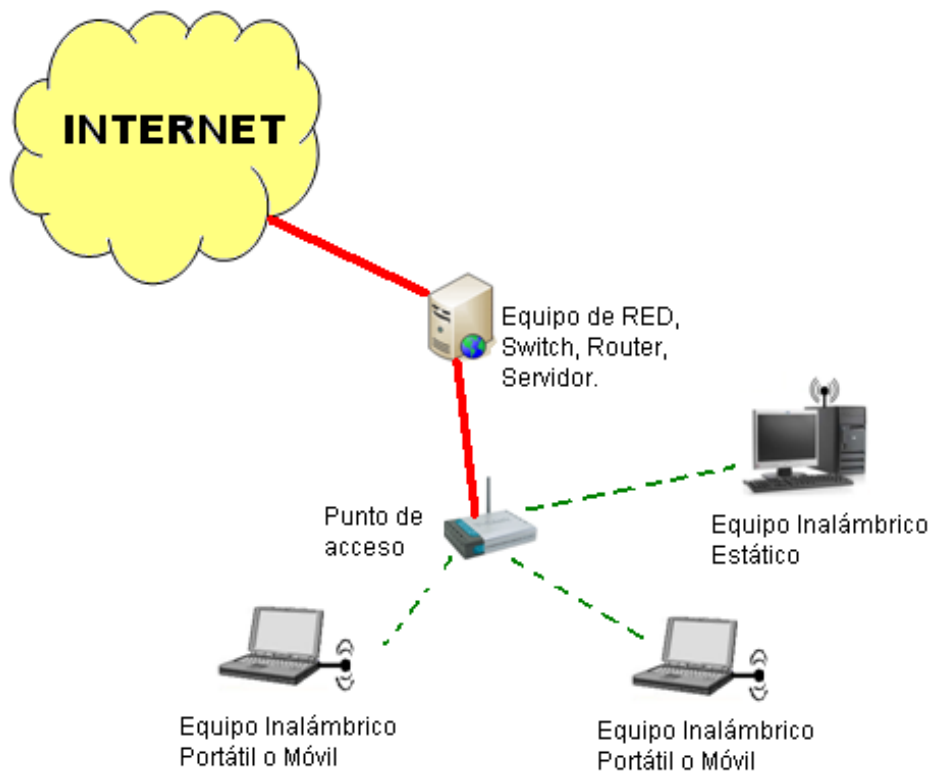


Figura 1-1 Elementos básicos de un WLAN. [Por los autores adaptada de [11]].

Las redes inalámbricas como las redes Wi-Fi, WAVE³, etc., están conformadas por uno o más puntos de interconexión que se organizan de tal manera que con su configuración y posicionamiento estratégico, se brinde cobertura a una zona específica para la transmisión de información. Estos puntos en las WLAN tradicionales son los llamados Puntos de Acceso que se utilizan tanto para irradiar ondas electromagnéticas, como para realizar tareas de administración de la red; con ellos se hace la interconexión al *backbone* de la red inalámbrica y también sirven de interfaz con las redes cableadas. Dentro de la estructura de red también existen los nodos de usuario o terminales, que son quienes reciben la información de la red, los cuales están interconectados a través de los puntos de acceso.

Para el caso de la redes WAVE existen dos tipos de nodos que tienen igual funcionamiento en cuanto al papel que desempeñan en la red, cumplen con las mismas tareas, pero se diferencian solo en su capacidad de movilidad; estos nodos según la ubicación en la que se encuentren (vehículo o vía) se los denomina Unidad a Bordo (OBU, *On Board Unit*) y Unidad al Lado de la Carretera (RSU, *Road Side Unit*) respectivamente; en la figura 1-2 [12] se pueden ver los elementos básicos de una red WAVE.

³ *Wireless Access in the Vehicular Environment.*

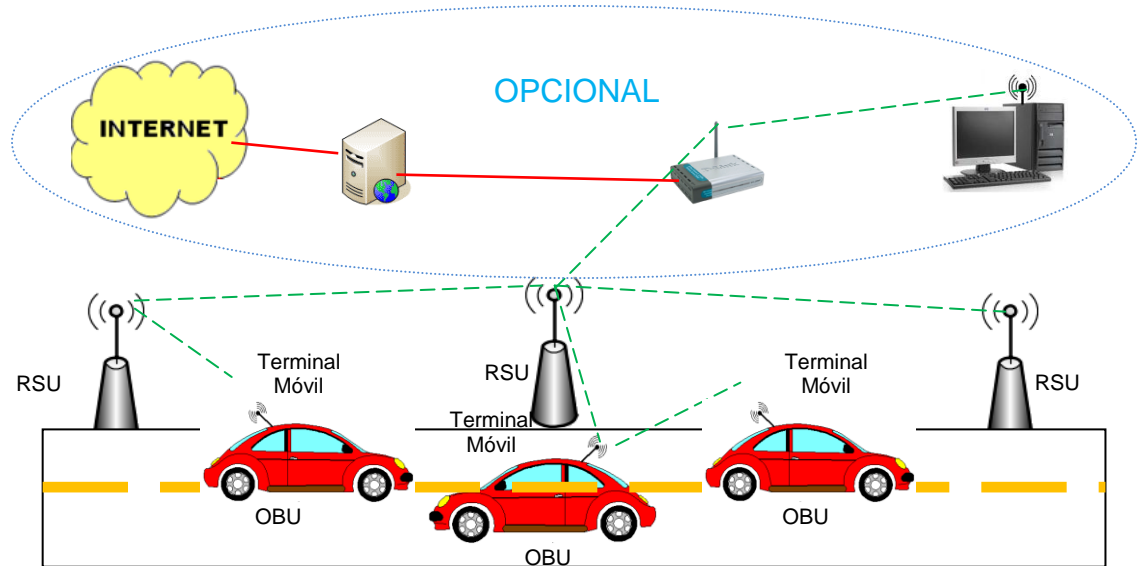


Figura 1-2 Elementos básicos de una WAVE. [Por los autores adaptada de [12]].

En un entorno particular, como el vehicular, se hace necesario, configurar las tecnologías de interconexión de la mejor manera, para dar a este un soporte eficaz. Debido a la flexibilidad que se requiere para brindar un buen cubrimiento a los usuarios de este tipo de redes, es importante tener en cuenta el tipo de topología que se adecua mejor en cada sector de movilidad, para reducir los inconvenientes al mínimo en cuanto a interconexión de la señal de información. Tema que servirá como fundamento para el desarrollo de los siguientes capítulos.

1.1.1 Topologías en Redes Inalámbricas

Una red inalámbrica puede ser extendida tanto en pequeños espacios como en amplias extensiones territoriales; es por esto que al tratar de tender una red basada en equipos inalámbricos, las topologías son muy variables dependiendo de las necesidades que se tenga en cuanto a movilidad, costos, etc.; por lo cual se pueden implementar diversas topologías de red, las cuales se describen a continuación:

1.1.1.1 Redes de infraestructura

La topología de tipo infraestructura es capaz de brindar a una red inalámbrica mayores capacidades de expansión, de configuración y de interconexión con otro tipo de red. Esta topología utiliza uno o más puntos de acceso para dar el suficiente alcance en cuanto a movilidad se refiere, que es lo que se conoce como *roaming*, es decir, que los terminales de usuario pueden moverse de un punto de acceso a otro sin perder la cobertura y sin sufrir cortes en la comunicación, representando esto como una de las características más interesantes de las redes inalámbricas. Otra característica de estas redes es la capacidad que tienen los puntos de acceso para conectarse a las redes cableadas, formando de esta

manera redes híbridas (WLAN-Ethernet) para así proporcionar accesos a diferentes servicios de distintos servidores, como HTTP, FTP, telnet, etc. o tan simple como brindar un acceso a Internet.

Cuando se utiliza como esquema este tipo de topología, los usuarios deben comunicarse únicamente con los puntos de acceso y a través de ellos con otros usuarios de la red (no existe comunicación directa entre usuarios); los puntos de acceso realizan las tareas de administración requeridas para permitir que todos los usuarios accedan a los diferentes recursos de la red, pero existen desventajas en el momento en que un punto de acceso 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.

El alcance máximo, en distancia, de las redes inalámbricas con esta topología se mide entre cada punto de acceso y la estación terminal; para maximizar el alcance de las redes de infraestructura es necesaria la instalación de otro punto de acceso adicional. Esta topología utiliza celdas que representan el área efectiva de la señal radioeléctrica irradiada por el punto de acceso. De las redes inalámbricas se tiene la noción de que cada celda tiene un tamaño de cobertura pequeño, pero mediante el incremento en el uso de más dispositivos de emisión es viable la expansión para cubrir zonas con áreas extensas, como se muestra en la figura 1-3.

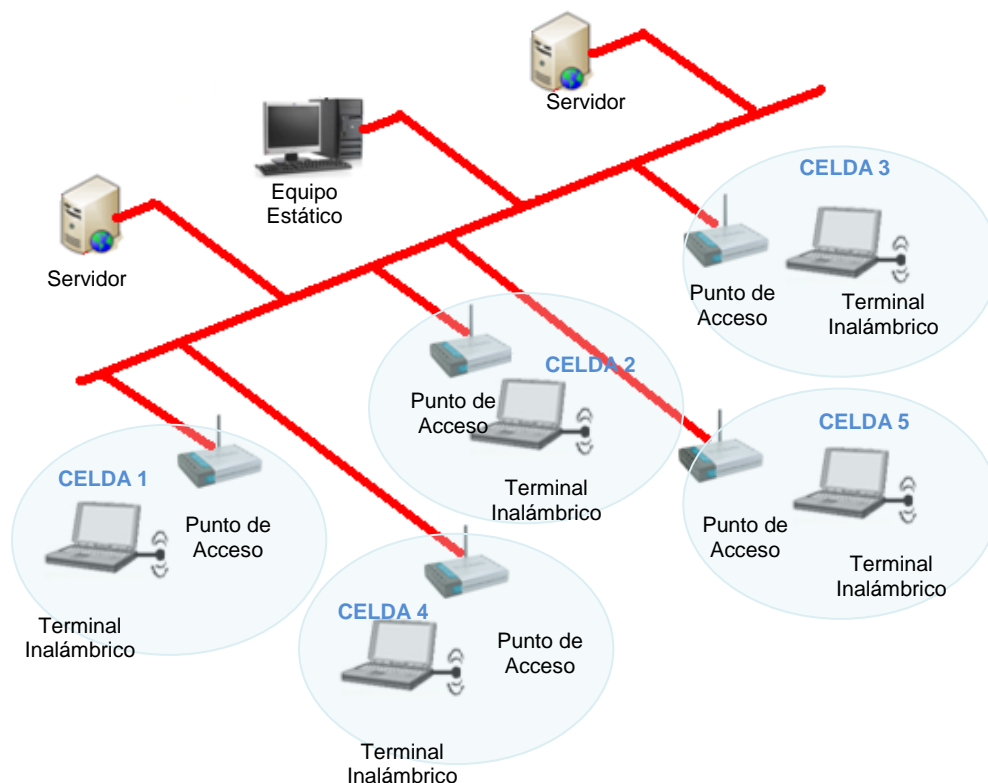


Figura 1-3 Red inalámbrica en modo de infraestructura [Por los autores].

1.1.1.2 Redes Ad Hoc

A esta topología de red también se la conoce como red de “igual a Igual” o por su nombre en inglés *Peer to Peer* (P2P), es la topología más simple de configurar. 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 1-4.

La topología Ad Hoc, ver figura 1-4, permite que las tarjetas de red inalámbricas se comuniquen entre sí, independientemente, no hay diferencia entre los nodos de la red, es decir, todos los nodos son iguales. No existe ninguna funcionalidad de punto de acceso. Así, las comunicaciones fluyen directamente de nodo en nodo hasta llegar a su destino; 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. Cada terminal de usuario funciona como un nodo, tan solo se debe identificar en la red por medio de un Identificador de Conjunto de Servicios (SSID) como todo nodo en la red.

Además, estas redes tienen la ventaja de dispersarse fácilmente, solo se necesita que el terminal a conectarse esté dentro del rango de cobertura radioeléctrica de al menos uno de los nodos e identificarse con la red y ya hace parte de ella; pero se debe tener en cuenta de no sobrepasar un número razonable de terminales dentro de la red o de lo contrario el rendimiento se verá afectado. Este tipo de configuración es bastante confiable ya que la caída de un nodo no implica la caída de la red. Las redes Ad Hoc son independientes de cualquier tipo de gestión administrativa haciendo que éstas sean las más económicas y de fácil implementación.

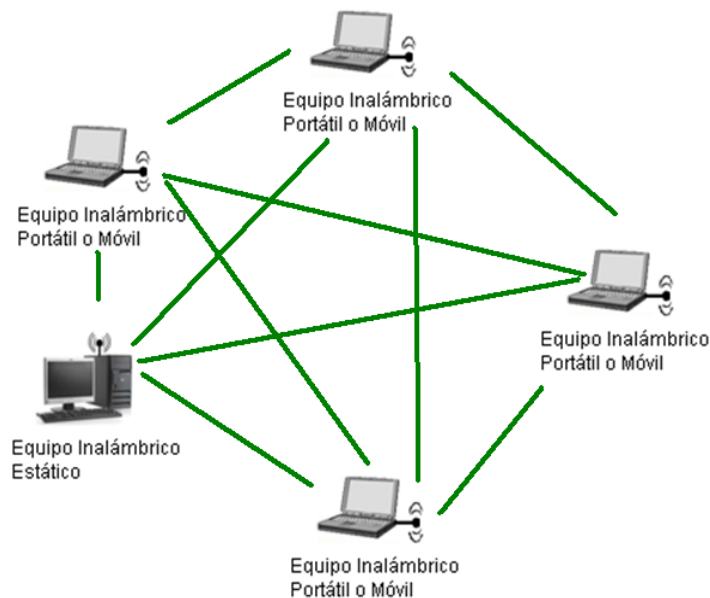


Figura 1-4 Red inalámbrica en topología Ad Hoc. [Por los autores]

1.1.1.3 Redes en malla

La topología inalámbrica en Malla se configura combinando los dos tipos de topología anteriormente descritos. Generalmente son redes Ad Hoc que se interconectan a través de nodos especiales o puntos de acceso con otras redes Ad Hoc, de esta manera un terminal de usuario puede conectarse a la red utilizando el punto de acceso adyacente como enlace.

Actualmente, existe un interés elevado, tanto comercial como investigativo, sobre la aplicación de arquitecturas de redes Ad Hoc en las comunicaciones inalámbricas en entornos vehiculares, donde la variedad de fabricantes de autos y de dispositivos de red denotan este creciente interés en la industria; además, los principales grupos de estandarización se encuentran definiendo la nueva norma IEEE 802.11p, que permitirá una mayor implantación de estas redes e interoperabilidad entre ellas dentro de los entornos vehiculares. El presente capítulo entrega una descripción básica de conceptos generales relacionados con las redes inalámbricas Ad Hoc, por el interés que para este proyecto tiene la aplicación de estas redes en la conectividad inalámbrica sobre entornos vehiculares y para el mejoramiento de sus comunicaciones.

1.2 DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA RED INALÁMBRICA AD HOC

A continuación se profundiza en los beneficios que ofrecen las redes Ad Hoc, para la incorporación de este concepto tecnológico en las redes vehiculares.

Una red Ad Hoc se define como la interconexión entre dos o más terminales de usuario de manera rápida para establecer comunicaciones entre ellos [13]; los terminales pueden ser fijos y móviles o solo móviles. La red Ad Hoc es capaz de establecer conexiones entre terminales sin la necesidad absoluta de recurrir a dispositivos de infraestructura preinstalada, por lo tanto no demanda estaciones base, ni cables, ni enrutadores estáticos. Dichas redes pueden estar conformadas por terminales móviles independientes basados en radio enlaces; además los terminales podrían estar conectados a redes de diferentes tipos como a redes GSM, fijas, etc.

Las redes Ad Hoc están a la expectativa sobre los cambios que se producen por el continuo movimiento de los terminales y las nuevas posiciones que toman éstos en un determinado tiempo y lugar; de tal manera que las redes Ad Hoc deben ser adaptativas y auto-configurables para mantener la comunicación estable debido a los repentinos cambios de configuración; estas redes no poseen la intervención de un tipo de administración del sistema. En su implementación una red Ad Hoc puede estar conformada por centenares de estaciones móviles o nodos de comunicaciones con los cuales se puede cubrir zonas radioeléctricas de 30 a 100 metros en interiores y de 100 a 300 metros en exteriores por cada nodo.

Las redes Ad Hoc tienen la posibilidad de que un nodo se comuniquen con un segundo nodo aun cuando el segundo no esté dentro del radio de cobertura del primero, debido a la existencia de otros nodos que hacen de intermediarios dentro de la comunicación, brindando un camino o ruta entre los dos; así estos nodos intermedios actúan de enrutadores, reenviando los paquetes de información entre ellos hasta el nodo de destino;

por estas características de reenvío de información se puede decir que una red Ad Hoc es una red inalámbrica multisalto.

La topología dinámica de las redes Ad Hoc crea escenarios distintos y dinámicos dentro de tiempos y lugares impredecibles; los enlaces creados cambian de características en el tiempo arbitrariamente y de forma libre pudiendo ser enlaces unidireccionales (comunicación un solo sentido) o bidireccionales (comunicación en los dos sentidos) según las prestaciones que requiera el enlace dentro de las condiciones actuales de la red; cada nodo inalámbrico puede descubrir a otros nodos, autenticarse y establecer comunicaciones, y determinar el mejor camino, más corto y eficiente, para transmitir información privada o hacer un *broadcasting* con información pública, además se proporciona conectividad a los nodos circundantes. De esta forma, si un enlace falla o un nodo se encuentra congestionado, la información se redirige al nodo más cercano con menos tráfico, de tal forma que los paquetes de información continúan saltando de un nodo a otro por la ruta alterna más eficiente, por la cual la información puede llegar a su último destino. Todo este proceso de auto configuración y auto encaminamiento es dinámico, ocurre en un segundo plano y en tiempo real, siendo transparente para el usuario y sin supervisión humana.

1.2.1 Cobertura de una Red Ad Hoc

Este tipo de redes permite a quien la implementa la posibilidad de no limitarse en cuanto a dar cobertura a una zona se refiere; la topología es tan flexible que se puede cubrir casi todas las zonas que sean imaginadas, exceptuando las zona con restricciones políticas o privadas para las cuales habría que obtener un certificado o permiso; otro punto a considerar antes de extender una red Ad Hoc es estudiar la zona muy detenidamente y no ocasionar con ella interferencias con otras redes ya establecidas en la zona que se quiere cubrir, por tal motivo las redes Ad Hoc son muy versátiles, las zonas de cubrimiento se miden según los nodos que se utilice, al agregar más nodos a la red se cubrirán extensiones más grandes de territorio, y como se había dicho, estas redes son flexibles permitiendo rodear o saltar obstáculos como muros, edificios, montañas y demás, que pueden llegar a obstruir la línea de vista, como se puede observar en la figura 1-5.

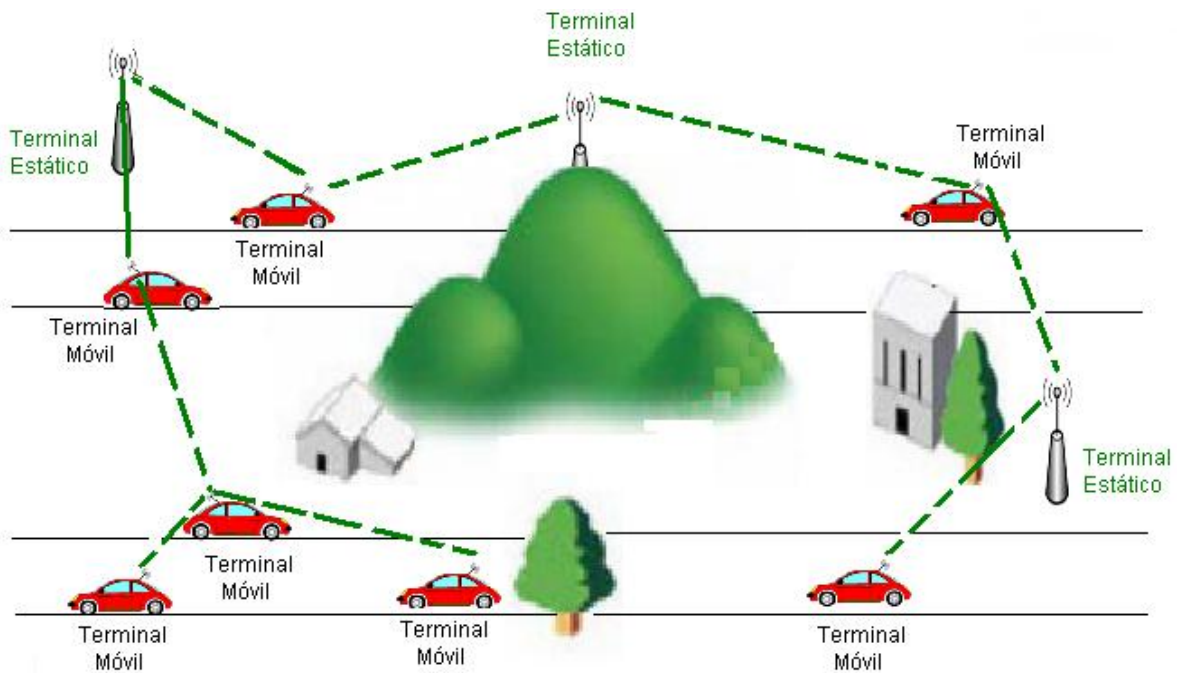


Figura 1-5 Flexibilidad de la red Ad Hoc frente a obstáculos [Por los autores].

La instalación de las redes Ad Hoc no necesariamente requiere una planeación compleja previa, ya que su implementación es muy versátil, se requiere poco tiempo para ponerla a funcionar logrando comunicaciones fiables, y si la señal se ve afectada por algún motivo basta con mover o añadir otro nodo y se logrará mejorar la calidad de la señal afectada o débil, además existen protocolos de enrutamiento que contribuyen a mantener la interconexión prolongando la supervivencia [14] de la red, por tal motivo las redes Ad Hoc ofrecen un buen desempeño en zonas urbanas muy pobladas o zonas rurales donde el ambiente geográfico es desfavorable para las redes inalámbricas de infraestructura o las redes cableadas.

1.2.2 Riesgos en las Redes Inalámbricas

Dentro del mundo inalámbrico no todo es ventajas y mejoras en cuanto a movilidad, economía, flexibilidad y escalabilidad también existen algunos riesgos inherentes al hecho de no tener rutas fijas o cables que las proporcionen, estos riesgos pueden directamente afectar factores importantes como la integridad de la red, la confidencialidad de los datos, etc.

La propagación radioeléctrica de ondas, de por sí no tiene ningún elemento que la controle, de tal manera que es casi imposible controlar ésta y teniendo en cuenta que la radiación ocurre en tres dimensiones, la cobertura puede penetrar zonas en las que se cause interferencia por propagación desmedida, además las ondas podrían ser interceptadas por intrusos e ingresar a la red sin ser autorizados.

De lo anterior se pueden observar algunos riesgos [15] como:

- Libre Acceso: En un determinado instante, el incremento del número de terminales de usuario podría llegar a provocar en la red una gran saturación, desencadenando una disminución apreciable en la eficiencia, ancho de banda de los terminales e intensidad de la señal, degradando así la calidad de la red y posiblemente provocando una pérdida de conectividad entre los terminales de usuario.
- Información Insegura: Debido a que la información viaja sobre un medio expuesto, personas ajenas a la red pueden interceptar información y apoderarse de contraseñas, de información privada etc.
- Recursos Libres: Por lo anteriormente descrito un hacker puede robar o destruir información valiosa o hacer uso de recursos como Internet gratuito, llamadas de voz gratuitas, etc. y también realizar ataques cibernéticos.
- Interferencia de Radio: Las ondas de radio son muy sensibles a la interferencia. Por ello una señal se puede interferir fácilmente con una transmisión de radio que tenga una frecuencia cercana a la utilizada por la red inalámbrica. Hasta un simple horno microondas puede hacer que una red inalámbrica se vuelva completamente inoperable si se está usando dentro del rango del punto de acceso.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente y las ventajas que ofrecen las redes inalámbricas se puede decir que éstas son muy convenientes y fáciles de desplegar pero en el momento de implantar un control resulta algo complejo lograrlo, por esto, para satisfacer los objetivos y motivaciones de este Trabajo de Grado se va a tener en cuenta que los escenarios a simular se consideran ideales y con el manejo adecuado en cuanto a la disposición de los recursos de usuario, de red y del entorno se refiere.

Desde el inicio de este Trabajo de Grado se da a conocer al lector la temática de las redes inalámbricas y en especial las móviles, por lo tanto también es conveniente introducirse en los mecanismos de apoyo bajo los cuales las redes Ad Hoc móviles se basan para establecer una ruta a los datos transmitidos por ellas, es así como el conocimiento de la siguiente temática brinda alternativas que irán de la mano con la enmienda IEEE 802.11p [16].

1.3 PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN REDES MANET

Una MANET o Red Ad Hoc Móvil, es una red inalámbrica en topología Ad Hoc caracterizada por tener terminales móviles. Estas redes utilizan protocolos de enrutamiento no tradicionales, puesto que, los tradicionales, no ofrecen una solución eficiente para las dificultades inherentes de las MANET, debidas a la propia naturaleza de las redes Ad Hoc, de igual manera no se puede establecer estabilidad en las rutas, en los niveles de *overhead* y en niveles de latencia aceptables. Por lo tanto las redes Ad Hoc hacen uso de algoritmos mejor dotados y específicos que permiten enrutar los paquetes de información de nodo a nodo, sustentando niveles de calidad aceptables. Algunos protocolos de enrutamiento usados en MANETs son: protocolos proactivos, reactivos, híbridos y geográficos [17].

1.3.1 Protocolos Proactivos [17] [18]

Estos protocolos buscan descubrir y enrutar por los caminos que se establecen desde cada uno de los nodos a otro. Este procedimiento se realiza de forma cíclica, de tal manera que el camino se conoce de antemano y siempre está disponible una ruta estable, por lo cual no se ocasiona pérdida momentánea de tiempo o retrasos en la transmisión de información. Este tipo de protocolos son especialmente útiles en aplicaciones en tiempo real y aplicaciones interactivas. Los mecanismos más importantes acogidos en este tipo de protocolos son:

- Incrementar la capacidad de almacenamiento de información en cada nodo de la red. Con esto se busca minimizar los bucles y aumentar la velocidad.
- Cambiar continuamente la frecuencia de actualización de la información de enrutamiento o su volumen.
- Optimizar la sobrecarga de información.

Algunos ejemplos de protocolos proactivos son: Destino Secuenciado por Vector de Distancia (DSDV, *Destination Sequenced Distance Vector*), Protocolo de Estado Fisheye (FSR, *Fisheye State Protocol*), Enrutamiento Optimizado del Estado del Enlace (OLSR, *Optimized Link State Routing*) y Protocolo de Enrutamiento Inalámbrico (WRP, *Wireless Routing Protocol*) [17].

1.3.2 Protocolos Reactivos [17] [18]

Estos protocolos son otra forma de enfrentar el enrutamiento en entornos móviles, un protocolo reactivo es el que busca un camino para enrutar información por demanda, es decir, solo realiza el proceso de descubrir la ruta cuando existe información para ser transmitida. Este procedimiento es caracterizado por el uso mínimo y restringido de las tablas de enrutamiento y no por la eliminación de ellas. Por lo tanto se considera que el protocolo debe ser más robusto y moderno para que sea capaz de utilizar técnicas apropiadas para reconocer repentinos cambios en la topología de la red; se está hablando de protocolos “bajo demanda” es decir que se calcula la ruta en el momento justo antes de transmitir.

Como ejemplos de protocolos reactivos se tiene: Vector de distancia por demanda Ad Hoc (AODV, *Ad Hoc On Demand Distance Vector*) Protocolo de Enrutamiento Basado en Asociación (ABR, *Associativity Based Routing Protocol*), Protocolo de Enrutamiento de Fuente Dinámica (DSR, *Dynamic Source Routing Protocol*) y Algoritmo de Enrutamiento Ordenado Temporalmente (TORA, *Temporally Ordered Routing Algorithm*).

1.3.3 Protocolos Híbridos [17] [18]

Los protocolos híbridos asocian las características de los protocolos proactivos y reactivos para sacar sus mejores ventajas y armonizar el entorno, de esta manera se logra reducir la latencia en el momento de calcular la ruta y optimiza la convergencia del protocolo, esto

se realiza enrutando una zona específica por cada nodo, la zona a cubrir está conformada por nodos móviles, un ejemplo podría ser una red Ad Hoc entre vehículos, posicionados a una determinada distancia respecto del nodo "principal", dentro de un radio de acción especificado, estas zonas podrían estar solapadas. Entre los límites de la zona nodal se utiliza el protocolo de enrutamiento proactivo, dando de esta forma a los nodos internos la ruta adecuada para encontrar a sus nodos vecinos. Para transmitir información a un nodo por fuera del área de cobertura nodal se utiliza el protocolo de enrutamiento bajo demanda o reactivo.

Ejemplos de protocolos Híbridos son: Vector de Distancia Adaptativa (ADV, *Adaptive Distance Vector*) y Protocolo de enrutamiento de zona (ZRP, *Zone Routing Protocol*).

1.3.4 Protocolos Geográficos [17] [18] [19]

Como su nombre lo sugiere, el protocolo hace uso de coordenadas geográficas, su funcionamiento consiste en enviar paquetes de información a un área determinada donde el destino ya es conocido. En este protocolo se especifican dos modelos de áreas geográficas; el área o zona esperada y el área o zona solicitada, como en la figura 1-6. El área esperada es el área donde se presume se encuentra el destino, del cual de antemano se conoce sus coordenadas iniciales y su velocidad. El área solicitada es el área en la que existe mayor probabilidad de encontrar el destino, el área solicitada se define con datos asociados en el área esperada y la fuente.

Un ejemplo de protocolo geográfico es: Enrutamiento de ubicación asistido (LAR, *Location Aided Routing*) [19].

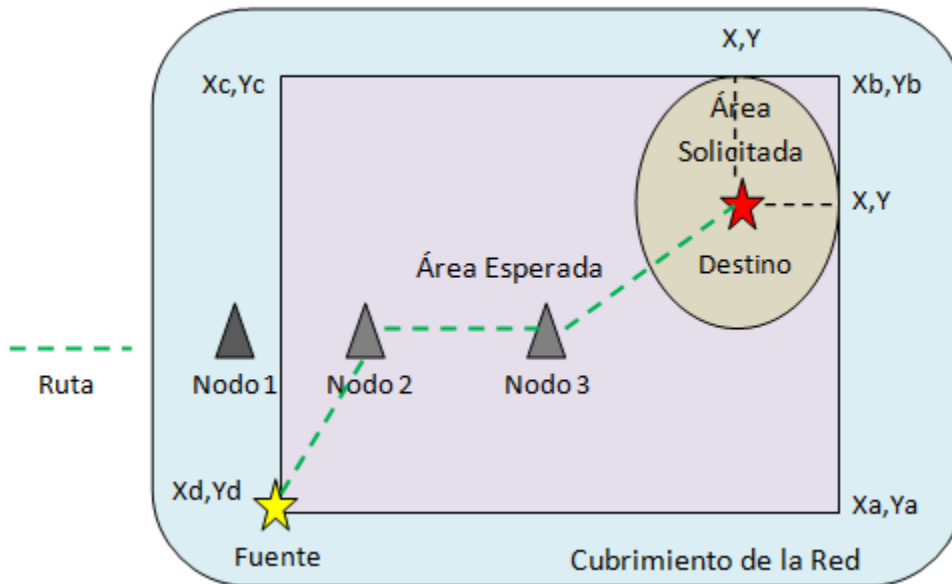


Figura 1-6 Localización de destino según datos geográficos. [Por los autores].

1.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES MANET [11] [20]

Las MANET tienen ciertas características que las hacen idóneas en los entornos móviles, como en los entornos vehiculares, en comparación con las redes inalámbricas tradicionales, porque proveen fiabilidad, facilidad de mantenimiento, robustez y una mayor flexibilidad y escalabilidad, donde los nodos regularmente se configuran con múltiples interfaces de distintas tecnologías de acceso. Con el objetivo de dar a conocer sus privilegios, se dará una breve explicación de sus características más relevantes, que les dan a estas redes ciertas ventajas existentes en comparación con las redes mono-salto.

1.4.1 Libertad de Integración

Los componentes de una MANET normalmente son una combinación de distintos dispositivos sin ningún esquema puntual, de los cuales se desconoce su hardware, más sin embargo pueden coexistir unos con otros, pueden integrarse muy bien con diferentes nodos, con diferentes interconexiones que podrían ser incluso de diferentes tipos de redes, en escenarios *outdoor* y de igual manera en escenarios *indoor*.

La integración inalámbrica podría darse entre estándares como 802.11 a/b/g/n/p; la adición de nuevos nodos es rápida pues las rutas se configuran automáticamente a través de una sola antena cercana tomando de ésta la señal requerida para la interconexión y el establecimiento de la nueva ruta. Además, las redes MANET están en capacidad de adaptarse fácil y rápidamente a los cambios repentinos de topología, a la adición, eliminación o cambio de posición de uno o más nodos.

1.4.2 Optimización Automática de Rutas

Éste privilegio de las redes MANET en comparación con las redes de un solo salto, radica en el hecho de que al utilizar un punto de acceso y varios nodos o dispositivos, estos en repetidas ocasiones intentan obtener acceso a la red al mismo tiempo y se produce congestión de tráfico, no susceptible al usuario, que disminuye la velocidad del sistema; contrastando con esto, en las redes multisalto, pueden conectarse a la red un sin número de dispositivos simultáneamente, por medio de diferentes nodos [17]. Las distancias de transmisión más cercanas de las redes MANET impiden la interferencia causada por otras fuentes y permiten el flujo de información simultánea y separada.

1.4.3 Red de Múltiples Saltos

Uno de los principales objetivos a la hora de implementar una red MANET es ampliar, casi sin límites y de forma libre el rango de cobertura de la red inalámbrica sin comprometer el desempeño del canal y proporcionar rutas alternas a terminales de usuario que presenten enlaces sin línea de vista directa o con congestión de tráfico alto o muchos otros inconvenientes. La forma de lograr este objetivo, es el diseño de una red Ad Hoc con múltiples saltos, con lo cual se crea un ambiente apto para lograr un alto *throughput* y además obtener de esta manera una disminución en la probabilidad de interferencia entre los nodos y una mayor eficiencia en la reutilización de la frecuencia.

Los enlaces con múltiples saltos pueden introducir algunas pérdidas por cambio de la señal de un nodo a otro, esta pérdida se equipara con el aumento del *throughput* total efectivo de la comunicación, suscitado por la ganancia en velocidad que se obtiene en cada nodo debido a la utilización de saltos cortos. Por ejemplo, si se implementa una red MANET con el estándar IEEE 802.11p que a distancias cortas permite alcanzar velocidades de aproximadamente 27 Mbps [21], la velocidad final de la red se incrementará por la contribución de velocidad que cada nodo fija en su respectivo salto y aunque pueden presentarse algunas pérdidas en las rutas, el desempeño será más favorable en la red que el obtenido por una red inalámbrica convencional con un único salto de 27 Mbps en el que se debe transmitir todo el tráfico y afrontar las pérdidas producidas por la propagación.

1.4.4 Fácil Adaptación

Los terminales de usuario o nodos pueden contener dentro de su hardware de configuración, dispositivos que sirvan de pasarela, para la adaptación e interconexión con otros tipos de tecnología como redes cableadas e inalámbricas, así, se accede a múltiples tipos de servicios de diferentes redes tales como HSDPA, WiMAX, redes de sensores, etc.

1.4.5 Ancho de Banda Autosuficiente

De las redes inalámbricas se conoce que el ancho de banda mejora cada vez que la distancia se acorta, ya que el aumento de la distancia facilita la interferencia y aumenta el desvanecimiento y la probabilidad de intervención de obstáculos, produciendo un aumento en la pérdida de paquetes de información. Por lo cual, las redes MANET mitigan estos problemas con su capacidad de autoconfiguración y enrutamiento automático, obteniendo mejores condiciones en un momento y entorno dado, salvaguardando la efectividad de la conexión y brindando un ancho de banda óptimo, haciéndolas autosuficientes, de donde se puede deducir que varios nodos son mejor que uno sólo y que la transmisión de datos mejora sus características de estabilidad si se dispone de varios saltos cortos y no de un solo largo, como se puede observar en la figura 1-7. Para lograr esto, cada nodo está equipado con dispositivos de comunicaciones aptos para servir de puntos de repetición y así brindar un camino disponible para llegar a nodos distantes.

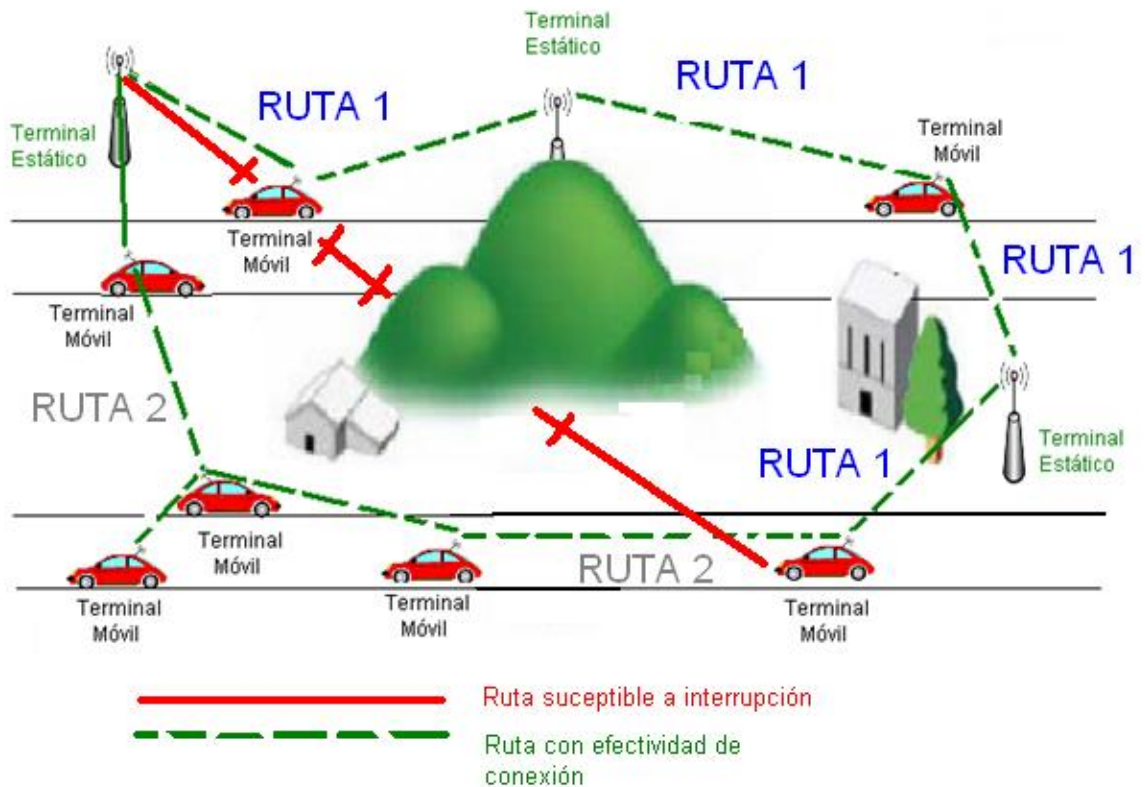


Figura 1-7 Transmisión de Datos Estable en rutas con saltos Cortos. [Por los autores]

1.4.6 Robustez y Efectividad

Esta es otra característica de gran importancia ya que las redes inalámbricas son consideradas como inestables y poco eficientes y más aún las móviles. Las redes MANET son más robustas que las redes de un solo salto debido a su efectividad en cuanto al reúso de recursos para establecer nuevas conexiones y salvaguardarse de otras, ya que no dependen del desempeño de un solo nodo para su operación. Las redes MANET a diferencia de las redes de un único salto no están condicionadas a un solo nodo, si alguno sale de servicio lo reemplaza otro con una nueva reconfiguración de red y la red continua operando sin inconvenientes por interferencia local o atenuación, pues, se enrutan los datos por un camino alterno creando un sistema auto reconfigurable, con lo cual se proporciona redundancia, estabilidad y confiabilidad a la red, la figura 1-8 lo muestra claramente.

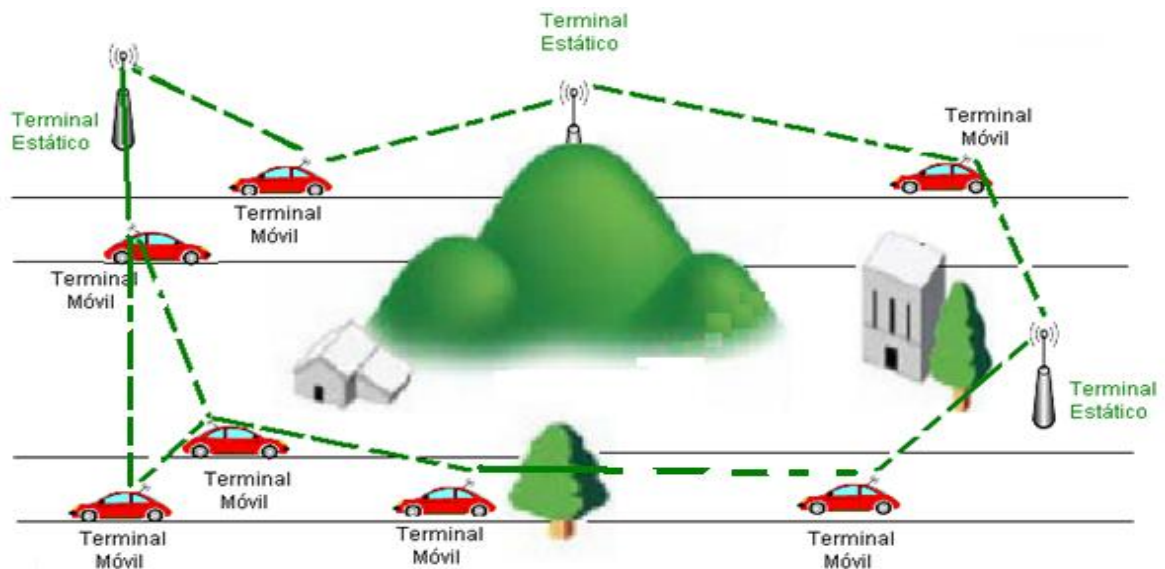


Figura 1-8 Redundancia, Estabilidad y Confiabilidad de la Red Auto configurable. [Por los autores]

Las redes MANET tienen la característica de propagarse fácilmente sin importar su posición geográfica dentro de la red, puesto que no existen jerarquías, por lo tanto se puede decir que es escalable. Además pueden manejar centenares de nodos, debido a que el funcionamiento de la red no depende de un punto central de control y por lo tanto, la adición de múltiples conjuntos de nodos o pasarelas es muy factible.

De las redes inalámbricas se puede decir que necesitan ser confiables, adaptables y escalables pero si se hace una comparación con los distintos tipos de redes se puede establecer que por ejemplo, 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. De forma opuesta, las redes MANET por su naturaleza, se adaptan fácilmente y son bastante confiables en entornos móviles y en arquitecturas complejas, y son fácilmente escalables llegando a manejar un sin número de puntos finales.

1.4.8 Autonomía

Cada uno de los terminales de usuario es un nodo autónomo con capacidad de procesar información proveniente de otros nodos y enrutarla hacia su destino final o transitorio de la misma red. Debido a esta característica fundamental, el funcionamiento de la red no depende de infraestructuras previas, logrando así ser más tolerante a fallos del sistema.

1.4.9 Control Distribuido

Cada nodo proporciona a la red recursos de control en el momento de ser solicitado, adecuando la red para un funcionamiento óptimo. Teniendo en cuenta que este tipo de redes no posee una infraestructura para el control de sí misma, por lo tanto se realiza esta tarea de forma distribuida en cada nodo.

1.4.10 Bajo Requerimiento de Energía

Con excepción de los nodos utilizados como pasarela o interconectados a través de otros dispositivos como enrutadores o switches fijos, etc., los nodos de las redes MANET pueden fabricarse con requerimientos mínimos de energía, por lo cual se pueden implementar equipos totalmente independientes energizados completamente con fuentes de energía alternativa como paneles solares, fuentes eólicas o para el caso de los nodos implantados a los vehículos, con la batería de el mismo automotor.

1.5 APLICACIONES DE LAS REDES MANET

Con el desarrollo de los dispositivos portátiles y la continua evolución de las redes inalámbricas, las redes Ad Hoc están ganando gran importancia con el creciente número de aplicaciones. Las redes Ad Hoc convencionales y mucho más las MANET pueden ser aplicadas a cualquier lugar donde haya escasa infraestructura de comunicación o ninguna infraestructura existente, o también donde el costo de una red es elevado o muy incómodo y complejo de implementar. El conjunto de aplicaciones es diverso y altamente dinámico además, se debe tener en cuenta que las aplicaciones tradicionales se están encaminando a las redes que presten movilidad y que brinden las facilidades de las redes Ad Hoc, de lo anterior se puede decir que las redes MANET heredaron y ampliaron las aplicaciones de las redes tradicionales.

1.5.1 Redes Residenciales

En la última década, las tecnologías en comunicaciones para el hogar acogen a las redes inalámbricas cada día más y más, debido a que con ellas se puede prescindir de los molestos cables que están destinados a desaparecer [22]. Los beneficios conseguidos con este tipo de redes son innumerables ya que gracias a las ventajas que proveen las redes inalámbricas se pueden interconectar casi todos los dispositivos electrónicos utilizados en este entorno, entre ellos están celulares, computadores de escritorio, equipos portátiles, agendas electrónicas, televisores, reproductores de DVD, consolas de video juegos, cámaras de vídeo y otros dispositivos electrónicos de consumo, ya que estos dispositivos tienen la facilidad de una configuración simple o de autoconfiguración.

1.5.2 Redes Comerciales Empresariales

Entre las nuevas estrategias comerciales para dar a conocer nuevos productos o el entrar a competir por captar nuevos clientes, las empresas han recurrido a la creciente demanda en la utilización de los dispositivos móviles, de tal forma que sus avisos y ofertas publicitarias las lanzan a través de transmisiones de información en forma *broadcast*, emisión de información sin discriminación de usuario, implantando dentro de centros comerciales redes autómatas capaces de interconectar nodos nuevos y que cambian de

posición en forma aleatoria dentro de una zona de cobertura reducida de tipo *indoor* y que crecen a medida que nuevos usuarios se adentran en la zona de cobertura.

Varias tecnologías se utilizan actualmente, entre ellas están Bluetooth y Wi-Fi en su mayoría, debido a que no se conoce el número de individuos a atender por la red, esta se configura para trabajar como una red MANET; aunque se podría pensar que estas redes no son las más aptas para estos entornos, como se había dicho anteriormente las MANET ofrecen una apreciable reducción de costo, infraestructura y gestión humana, que para una empresa que se dedica a la publicidad es lo suficientemente rentable ya que se cumple con el objetivo de la empresa de una forma eficiente y reduciendo considerablemente los recursos aportados por ella.

1.5.3 Redes en Situación de Emergencia

Las redes MANET pueden ser utilizadas en situaciones de emergencia y operaciones de rescate para reforzar los esfuerzos de socorro en casos de desastre, por ejemplo, en el fuego, una inundación o un terremoto. Las operaciones de rescate de emergencia, suelen tener lugar en entornos en que las comunicaciones no existen o está dañada la infraestructura y se necesita un rápido despliegue, haciendo necesaria una red de comunicación. La información se transmite de un miembro de equipo a otro a través de equipos pequeños que caben en la palma de la mano, además la implementación de estas redes en situaciones de emergencia, ayudan a mapear el lugar para facilitar la labor de los rescatistas asegurando un despliegue total del terreno y sin pérdidas de tiempo. En la figura 1-9 se puede ver la interconexión entre varios de los organismos de emergencia.

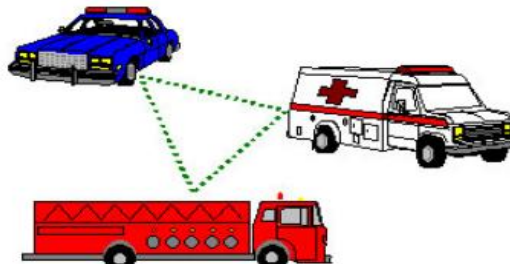


Figura 1-9 Interconexión entre organismos de Emergencia. [Por los autores]

1.5.4 Redes Militares

Entre los escenarios de aplicación más interesantes de estas redes, esta el uso en entornos militares. Por medio del uso de las redes MANET, los distintos grupos que conforman una misión pueden usar un medio de comunicaciones conjunto que permita a cada uno de los nodos tácticos (helicópteros, aviones, soldados, etc.) comunicarse entre sí, como se muestra en la figura 1-10, y al mismo tiempo estar comunicados con los centros de comando y control. Los despliegues militares en su mayoría se efectúan en lugares donde la infraestructura de comunicaciones es inexistente, escasa o inadecuada; la posibilidad de construir redes bajo demanda a medida que las necesidades así lo exijan, es la característica más atractiva de las redes MANET en este tipo de entornos [23].

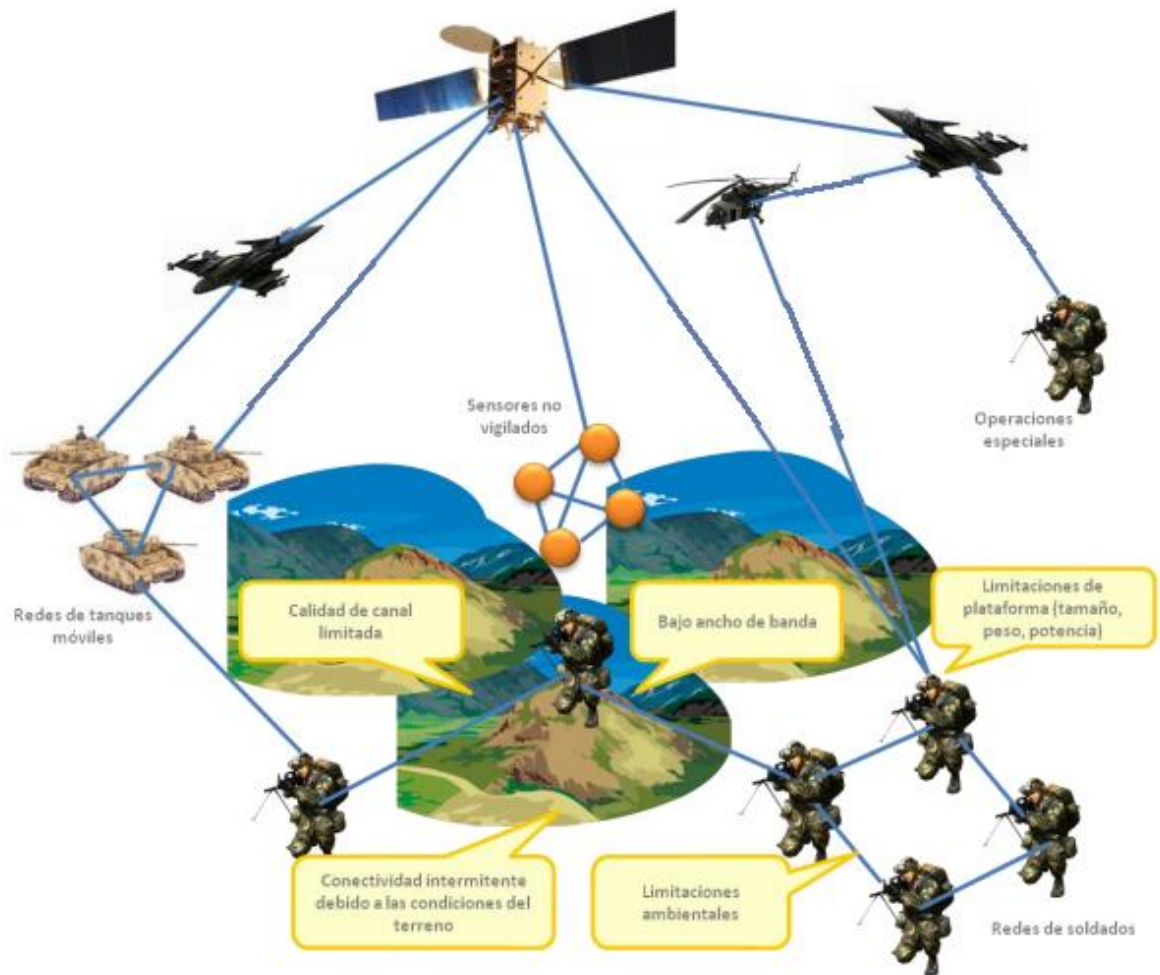


Figura 1-10 Las Redes MANET utilizadas bajo demanda en escenarios complejos [23].

1.5.5 Sistemas de Control y Monitoreo de Tráfico

El propósito del sistema es realizar un conteo fiable de los vehículos que transitan por uno o varios tramos de una carretera, con el fin de actualizar el estado de ella, para prevenir congestión y accidentes. Además el sistema puede incorporar, dentro de sus funciones, controles para implantación de sistemas de peaje automático con el fin de beneficiar la agilidad del tránsito por estos lugares y el control de los mismos.

El sistema de tráfico consta de los siguientes elementos:

- Sistema de Conteo y Clasificación de Vehículos.
- Sistema de Verificación Visual.
- Sistema de Verificación Automática.

1.5.6 Red de Sensores

Aplicaciones como esta pueden estar compuestas por dos o más elementos y tener un sinnúmero de utilidades ya que se trata de pequeños dispositivos inalámbricos y de bajo costo que funcionan capturando información detallada de alguna variable del entorno como temperatura, presión, humedad o cualquier otra para posteriormente transmitirla por medio de una red de nodos cercanos hasta su destino, que podría ser una central donde se procese la información o un terminal de usuario que vigila remotamente un proceso en particular. La principal característica es que no requiere una fuente de alimentación de alta capacidad puesto que los enlaces cercanos permiten una comunicación con poca potencia de transmisión [24].

1.5.7 Redes Vehiculares

Las redes vehiculares o VANETS son aplicadas en áreas metropolitanas o en las carreteras. Las redes VANETS son un caso particular de las redes *Ad Hoc* (MANET, *Mobile Ad Hoc Network*) enfocadas a entornos vehiculares, como se puede observar en la figura 1-8. La explicación detallada se dará más adelante en el capítulo 2. Por otro lado, las VANETS 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 como en las carreteras viales que atraviesan el país.

Las redes MANET no sólo están pensadas para los casos anteriormente descritos. Estas redes tienen muchas aplicaciones como ofrecer comunicación en el interior de una mina o en los sistemas de transporte masivo, etc. son bastantes los ejemplos de sus múltiples usos. Incluso existe una empresa sueca [25] que está utilizándolas para ofrecer cobertura móvil en zonas rurales, con teléfonos móviles diseñados para funcionar en modo P2P.

1.6 DIFERENCIAS ENTRE REDES MANET Y MESH

Al hablar de una red *mesh* se pueden definir dos tipos o conceptos de estas redes, uno es la topología *mesh* completa y dos es la topología *mesh* parcial. La primera es similar a mantener conectividad total como una red convencional no necesariamente cableada, es decir, una red de n nodos tendrá $n(n-1)/2$ enlaces directos. En la segunda topología los nodos están conectados a varios nodos pero no a todos, sosteniendo una total conectividad. Esta última definición se suele utilizar para describir también una red inalámbrica *Ad Hoc* o MANET. Sin embargo, al unir las características de una red *mesh* y una MANET es muy interesante el hecho de que se aplaca una de las dos topologías, ya sea la red *mesh* pierde su importancia y solo se habla de una red MANET o la MANET es quien pierde su importancia y solo se habla de una red *mesh*. Una red *mesh* se considera típicamente como una mezcla de nodos fijos y nodos móviles interconectados por enlaces inalámbricos, formando una red *Ad Hoc* multisalto móvil [26] o MANET. De igual forma se considera que una red MANET hereda propiedades de redes *Ad Hoc* y de redes *mesh*, componiendo así una red *mesh*, por lo tanto para describir mejor estas redes se expondrá algunas de sus diferencias en la tabla 1-1.

Tabla 1-1 Diferencias entre redes Manet y Mesh.

DIFERENCIA	MANET	MESH
Uso de infraestructura existente.	No Necesaria	Necesaria
<i>Backbone</i>	No	Si
Utilización de APs	No Necesaria	Si
Reconfiguración por usuario final.	Si	No

1.7 VOZ IP EN REDES INALÁMBRICAS

La VoIP y las redes sin cables definitivamente han cambiado el mundo de las telecomunicaciones interpersonales. Las ventajas que proveen las redes inalámbricas, crean escenarios que anteriormente no se pensaban aptos para establecer una comunicación, hoy en día esas ventajas admiten desplegar rápidamente servicios completos de telecomunicaciones como la transmisión de voz a través de redes de datos y a muy bajo costo, en zonas donde las comunicaciones son totalmente nulas, brindando de esta manera mayores opciones de *backhaul*⁴ en conexiones de última milla y que se extiende fácilmente a redes móviles. El valor agregado que ofrece la VoIP a las redes IP es bastante notorio de tal forma que este tipo de servicio entro a competir directamente con los modelos de telefonía implantados en redes fijas.

El progreso de las interconexiones inalámbricas y los servicios de voz sobre redes IP evidencian una alternativa viable para satisfacer los requerimientos de comunicación en zonas inhóspitas o en cualquier parte, sin importar la geografía, debido a que la movilidad y la cobertura se adaptan fácilmente, esto derivado de la redes WLAN, y también por aspectos de economía en cuanto a llamadas, además agregan dentro de sus funcionalidades, portales de voz, reconocimiento y generación del habla. Con todas estas capacidades surgen servicios de voz de calidad aceptable y alta movilidad, comparables a los de la telefonía celular, pero con los beneficios de los datos que dan un fuerte respaldo y acrecentamiento a este servicio.

Siendo la VoIP uno de los temas importantes de este trabajo de grado, es fundamental que el lector conozca de antemano conceptos sobre conversión análoga-digital, empaquetamiento de información a través de redes IP, direccionamiento y transporte de datos en redes de información como en Internet.

Para el caso concreto de las redes vehiculares, donde el usuario principal es el conductor y quien necesita de información sobre seguridad, estado de la carretera, estado del tráfico, climatología entre otros, es conveniente no apartarlo de su concentración visual

⁴ Literalmente significa "red de retorno". En telecomunicaciones, un *backhaul* es usado para interconectar redes entre sí utilizando diferentes tipos de tecnologías alámbricas o inalámbricas.

sobre el camino por lo tanto la información a través de la voz es una herramienta primordial y eficaz para la toma de decisiones en un momento dado. A continuación se hace referencia a la tecnología de VoIP.

1.7.1 La VoIP

Consiste en transmitir voz, que inicialmente ha sido transformada en paquetes de datos, desde un punto A a un punto B separados una distancia considerable. De esta forma las redes de datos están en capacidad de realizar llamadas telefónicas, y por lo tanto configurar una red única convergente que transporte y enrute o encamine comunicaciones de todo tipo, pudiendo ser de voz, datos o cualquier otro tipo de información. La telefonía IP hace que la transmisión de voz complemente la transmisión de datos, ya que estos dos mundos anteriormente han estado totalmente apartados uno del otro.

La telefonía IP no hace uso directo de conexiones físicas basadas en circuitos como la telefonía tradicional, a cambio multiplexa varias conversaciones en un único canal codificadas en paquetes y flujos independientes. Por otra parte, la VoIP dispone de métodos para detectar los silencios producidos por ausencia de la voz y así aprovechar esta inutilización del canal para transmitir datos de otras conversaciones, al contrario de la red telefónica pública conmutada que establece un circuito físico y no le da otro uso hasta que no termine la conversación y mucho menos entre los silencios, el método de la VoIP consiste en Detectar la Actividad de la Voz (*VAD, Voice Activity Detection*), y de esta forma en los intervalos de tiempo donde haya ausencia de ella, enviar la información de otras fuentes logrando hacer un uso eficiente del canal.

Dentro de la misma infraestructura que se utiliza para el desarrollo de conversaciones a través de la VoIP, también se puede proporcionar otro tipo de servicios, incluso simultáneamente, y además la velocidad de comunicación es mayor, comparada con las redes de telefonía conmutada. Pero no todo es tan sencillo y ventajoso en la redes IP, son varios los obstáculos que se presentan en la transmisión de voz de alta calidad, puesto que es imposible precisar 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 (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:

- Digitalización de la voz.
- Paquetización de la voz.
- Enrutamiento de los paquetes.

Si se habla de ancho de banda requerido para la VoIP, este es siempre considerablemente inferior a los 64 Kbps utilizados por la Modulación por Impulsos Codificados (PCM, *Pulse Code Modulation*) en la telefonía clásica. En general, el ancho de banda requerido es beneficiado al comprimir la voz con códigos más sofisticados y por la supresión de los períodos de silencio, pero es contrarrestado 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.

1.7.2 Compresión de Voz

Debido a que la voz es de carácter analógico, esta primero debe ser transformada a formato digital para que pueda ser transmitida a través de las redes IP. Para lograr esta transformación, la onda analógica debe ser sometida a un proceso de muestreo donde se utiliza un algoritmo que compresión y descompresión el cual logra convertir la voz a información digital, el algoritmo de compresión o códec analiza y sintetiza un bloque de muestras PCM de voz entregadas por un codificador, estos bloques tienen una longitud variable que depende del codificador, por ejemplo, el tamaño básico de un bloque del algoritmo G.729 es 10 ms. En la figura 1-11 [27], se muestra un ejemplo de cómo funciona el sistema de compresión G.729. La cadena de voz analógica se digitaliza en muestras PCM y se entrega al algoritmo de compresión en intervalos de 10 ms.

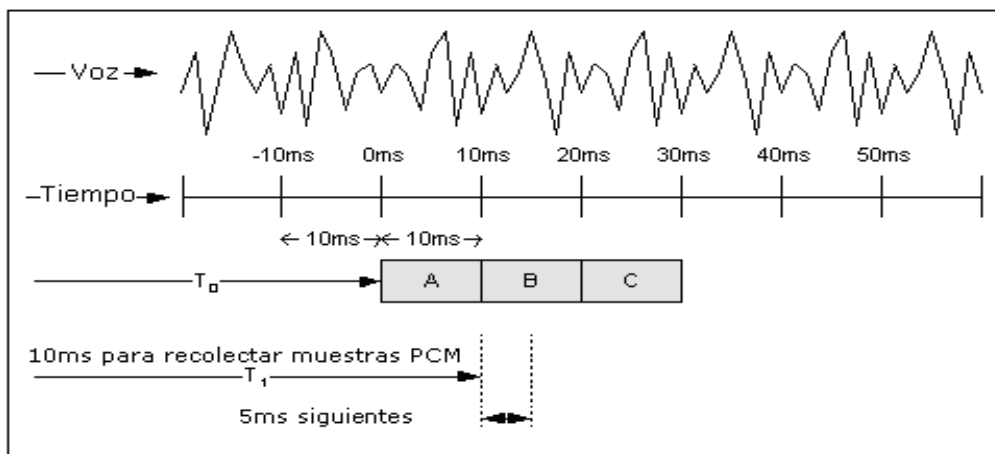


Figura 1-11 Sistema de compresión G.729 [27]

La codificación de voz se puede realizar a partir de varios algoritmos de compresión que se diferencian por el ancho de banda utilizado y la calidad de la comunicación. Luego, la voz se encapsula en paquetes que se transportan a través del Protocolo de Transporte en Tiempo Real (RTP). Para establecer una comunicación ágil y eficaz se requiere que los

interlocutores negocien el mismo códec para evitar la transcodificación que implica mayores retardos en la conversación. A continuación se describen los códecs de audio más conocidos y utilizados, con sus características más relevantes.

G.711: El Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (CCITT, *International Consultative Committee for Telegraph and Telephone*) aprobó la recomendación del G.711, el cual es un códec de voz que utiliza Modulación por Pulsos Codificados (PCM, *Pulse Code Modulation*) basado en el teorema de muestreo, el cual especifica que para muestrear la señal original se requiere al menos el doble de frecuencia de ésta, y con los valores obtenidos (normalizándolos a un número de bits), se puede codificar dicha señal en un tren de impulsos de alta frecuencia que porta la señal analógica original. Opera a una velocidad de muestreo de 8 KHz, con 8 bits por muestra para compresión y descompresión de la voz lo que permite su transmisión y recepción como datos binarios. Éste códec, que ejecuta la ley μ y la ley A para codificación y decodificación, se trata de un estándar internacional para codificación de audio a 64 Kbps que se usa ampliamente en redes telefónicas. En la Figura 1-12 [28] se observa el códec G.711 cuyo proceso de encapsulamiento se explicará más adelante.

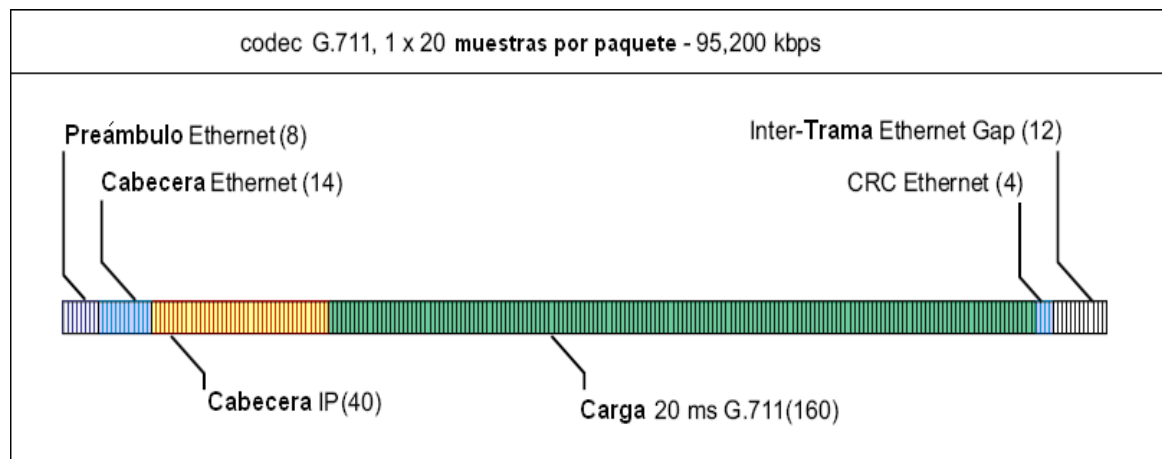


Figura 1-12 Códec G.711 [28].

G.722: Con él se puede transmitir audio de alta calidad utilizando Modulación por Impulsos Codificados Diferencial Adaptativa (ADPCM), a 7 KHz en 48, 56 o 64 Kbps. Además en la recomendación de este códec se permite la transmisión de datos a 16 Kbps y de audio a 48 Kbps sobre canales de 64 Kbps [25].

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 códec G.711 [25].

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

G.729: Este estándar de compresión, creado bajo el esquema de Predicción Lineal con Excitación por Código Algebraico de Estructura Conjugada de Complejidad Reducida (CS-ACELP, *Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction*), se basa en el modelo de codificación CELP y entrega una calidad de voz similar a la conseguida con ADPCM de 32 Kbps, pero disminuido a la cuarta parte de la velocidad. Así, con solo 8 Kbps o lo que es igual, 10 ms como intervalo para muestreo, G.729 ofrece la oportunidad de mejorar significativamente el uso del ancho de banda y es el más indicado a utilizar en comunicaciones de VoIP dentro de entornos para Redes de Área Extensa (WAN, *Wide Area Network*).

G.729A es una versión de menor complejidad del *códec* para aplicaciones de Voz y Datos Simultáneos Digitales (DSVD, *Digital Simultaneous Voice and Data*) y es el que ofrece la mejor relación Complejidad/Calidad de la industria, mirar ejemplo en la figura 1-13 [28].

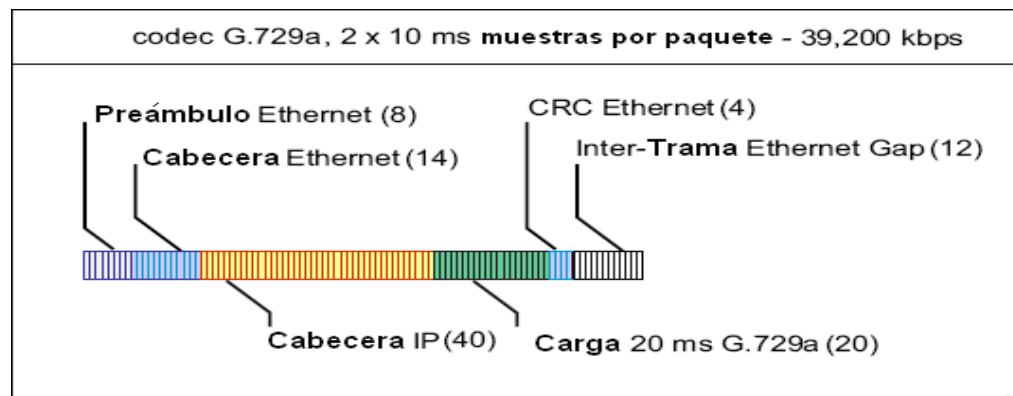


Figura 1-13 Códec G.729 [28].

G.729B y G.729AB son *códecs* de audio implementados bajo la recomendación ITU-T G.729B y sus anexos A y B, que incluyen las potencialidades de técnicas como Detección de Actividad de Voz, Generador de Ruido de Confort (CNG, *Comfort Noise Generation*) y Transmisión Discontinua (DTX, *Discontinuous Transmission*), lo cual permite supresión de silencios. La detección de actividad de voz suprime la transmisión de datos durante los periodos de silencio, lo cual es muy útil ya que cuando una persona está hablando lo hace únicamente por momentos, reduciendo así hasta un 50% la demanda por ancho de banda.

Códec para Sistemas Globales de comunicaciones Móviles (GSM): El códec 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.

Códec de Internet de Baja velocidad de Bit (ILBC) [29]: Es un códec 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 códec diseñado por el Departamento de Defensa Americano (DoD, *Department of Defense*) para una banda muy estrecha (2.4 Kbps) y bajo gasto de procesador.

La tabla 1-2 [30] muestra, de forma resumida, las características más sobresalientes de estos códecs.

Tabla 1-2 Códecs utilizados para VoIP

Códec	Velocidad Kbps	Tamaño de paquete (bytes sin encabezado)	Duración de un paquete (ms)¹	Puntuación MOS²
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 códec, etc. Evidentemente, el tamaño del paquete variará proporcionalmente.

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

1.7.3 Protocolos de la VoIP

El principal objetivo que se busca con la tecnología VoIP es establecer comunicaciones de voz haciendo uso de las redes IP, esto se logra dividiendo los flujos de audio en paquetes para luego procesarlos digitalmente. Los protocolos de las redes IP originalmente no fueron creados para el flujo de datos en tiempo real, ni de audio, ni otro tipo de comunicación. Como consecuencia de las necesidades surgidas por el uso de la VoIP, se crearon protocolos que adecuan y optimizan su funcionamiento sobre las redes IP, para así dar cabida a este tipo de servicio, especialmente, sobre redes con ancho de banda limitado.

Los organismos de estandarización como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y la IETF se preocupan por dar a la tecnología de VoIP soporte, y han ido evolucionado a lo largo de los años, superando las distintas barreras existentes de los protocolos como la escalabilidad, interoperabilidad con otras redes y entre fabricantes, etc. Existen varios protocolos como Intercambio entre Asterisk (IAX, *Inter Asterisk eXchange*), Protocolo de Control de Pasarelas hacia el Medio (MGCP, *Media Gateway Control Protocol*), Protocolo de Control de Cliente Ligerero (SCCP, *Skinny Client Control Protocol*), H.323 y Protocolo de Inicio de Sesión (SIP, *Session Initiation Protocol*) [31] que son los más conocidos. Por razones de simplicidad y flexibilidad el protocolo SIP es el más utilizado y por lo tanto, es del cual se dará una breve explicación para su mejor comprensión dentro de este trabajo de grado.

Hasta el momento, se han abordado las características fundamentales de las redes inalámbricas especialmente en su configuración Ad Hoc Móvil, identificando sus arquitecturas de red, escenarios de aplicación y principales protocolos de enrutamiento, 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 Ad Hoc Móviles pueden solucionar los problemas de comunicación entre puntos distantes, por lo cual se hace necesario estudiar las técnicas de transporte de contenido multimedia, como es la Voz y la importancia del Video IP, sobre estas redes y los factores que deben tenerse en cuenta para suministrar un servicio adecuado. Para cumplir con este propósito, en la sección 1.8 se detalla el funcionamiento del Video IP en las redes inalámbricas.

1.8 VIDEO IP EN REDES INALÁMBRICAS

Los esquemas de comunicación están cambiando a medida que transcurre el tiempo y el resultado es el continuo crecimiento en la demanda de servicios con contenidos multimedia. Las redes inalámbricas brindan el medio de accesibilidad más confortable para demandar el contenido multimedia, además la rápida evolución de la tecnología así lo exige. Las primeras redes desarrolladas para video tenían principalmente un enfoque uno a uno en donde se interconectaban estaciones para compartir datos multimedia en tiempo real, actualmente gracias a los avances y a las distintas redes de computadoras se puede acceder a videos digitales que pueden observarse en diferentes terminales de usuario y de manera simultánea, que es lo que se conoce como transmisión *multicast*.

1.8.1 El Video IP

El crecimiento y la continua implementación de redes IP, tanto cableadas como inalámbricas en zonas urbanas y en zonas remotas, han convertido al mundo en un lugar cada vez más “pequeño”, más accesible y casi sin barreras de comunicación, todos los días se demanda mejores métodos de comunicación y más formas para disfrutar de ellos. Aquí es donde el desarrollo de la tecnología busca la implementación de más servicios que ayuden a cubrir las necesidades que hay en cuanto a confort, seguridad y economía, llevando al desarrollo acelerado de técnicas avanzadas de digitalización de contenido multimedia como el Video, además de mecanismos de control y priorización de tráfico, protocolos de transmisión en tiempo real, etc.

El video IP, permite al usuario observar lugares, personas y situaciones remotamente, cada persona demanda imágenes de video para necesidades distintas y particulares, el uso del video es prácticamente personalizado, por lo tanto las redes IP han creado un entorno donde es posible transmitir video sobre IP.

Avances recientes en la tecnología han sacado a la videoconferencia de su incipiente infancia para convertirla en un producto viable y maduro. Otros desarrollos en la industria del vídeo, tales como Video por Demanda (VOD, *Video on Demand*), vídeo digitalizado, vídeo interactivo, *streaming* video y audio/vídeo en tiempo real están dotando a las personas de habilidades que no eran posibles unos o años atrás.

El vídeo IP, es un sistema que ofrece a los usuarios la posibilidad de controlar, monitorizar y grabar en vídeo a través de una red IP (LAN/WAN/Internet). A diferencia de los sistemas de vídeo analógicos, el vídeo IP no precisa cableado punto a punto dedicado y utiliza la red como eje central para transportar la información. El término vídeo IP hace referencia tanto a las fuentes de vídeo como de audio disponibles a través del sistema. En una aplicación de vídeo en red, las secuencias de vídeo digitalizado se transmiten a cualquier punto del mundo a través de una red IP con cables o inalámbrica, permitiendo la monitorización y grabación por vídeo desde cualquier lugar de la red.

1.8.2 Compresión de Video

Para comprender el significado de la compresión de video y su importancia en las redes de transmisión IP, es preciso poner un ejemplo, imagínese un individuo mirando una película, lo que él realmente está observando es una continua presentación de imágenes estáticas que cambian a una frecuencia de refresco determinada, y que el ojo humano no percibe, al cambiar tan rápido, son capaces de convencer al individuo de que está viendo un movimiento auténtico y real, por lo cual se puede decir, que no se observa un cuadro completo, sino que se crea la ilusión de ver una imagen en movimiento. Así se puede concluir que si la mayor parte de las imágenes que se observan en los videos, se mantienen inmóviles, son muchos los detalles que se repiten y podrían descartarse, como los fondos, que se repiten en cuadros sucesivos, para reducir la cantidad de información enviada. Y así disminuir el ancho de banda necesario para enviar las imágenes, derivándose un fenómeno a gran escala entre calidad Vs el ancho de banda y la economía en transmisión de video. Este fenómeno de disminución en el número de cuadros repetidos en los videos se denomina proceso de compresión digital de video.

En la década de los 80 surge la necesidad por optimizar los recursos computacionales en cuanto a capacidad de almacenamiento y de envío de imágenes a través de módems de baja velocidad, debido a esto, las imágenes digitales estáticas de alta resolución son comprimidas. El Grupo de Expertos Fotográficos Asociados (JPEG, *Joint Photographic Experts Group*) son quienes iniciaron con el proceso de compresión de imágenes. Según lo descrito en párrafos anteriores, el video es una secuencia de imágenes digitales estáticas. Los siguientes son los códecs más utilizados para la compresión de video en tiempo real.

MPEG-1: desarrollado en 1991, este estándar conocido oficialmente como ISO 11172, está pensado para entornos libres de errores como el almacenamiento digital, o aplicaciones multimedia y es optimizado para trabajar con resoluciones de 352x240 pixels a 30 cuadros por segundo (NTSC) o 352x288 pixels a 25 cuadros por segundo (PAL). Velocidad de transferencia desde 512 kbps hasta 1.5 Mbps.

MPEG-2: desarrollado en 1994, este estándar conocido oficialmente como ISO/IEC IS 13818, está basado en un conjunto de circuitos integrados, cuyo primer fabricante fue la compañía C-Cube Microsystems y aunque tiene una distribución muy parecida a MPEG-1, la industria lo ha adoptado con una velocidad sorprendente ya que mejora su estructura de trama y progresa tanto en capacidad como en funcionalidad incluyendo adicionalmente:

- Dos tipos de trama de sistema: Trama de programa (para entornos libres de errores) y trama de transporte (para entornos en los que existen errores).
- Soporte para la transmisión de canales criptografiados.
- Definición de un sistema de información que identifica los contenidos de la trama.
- Definición del sistema DSMCC (*Digital Storage Media Command Control*), que permite gobernar la reproducción de tramas de sistema guardadas en medios de almacenamiento digital.

Este procedimiento de codificación MPEG-2 abarca más formatos de codificación, puede utilizarse para la distribución de señales digitales de TV y HDTV, desde datos comprimidos con velocidades de menos de 4 Mbits/seg, pasando por la televisión convencional a velocidades entre 10 y 15 Mbits/seg, hasta la televisión de alta definición operando a 80 Mbits/seg.

MPEG-4: con el cual se puede obtener, video comprimido de 384x288 a 25cps con 22.050 Hz de sonido mono ocupando un tamaño relativamente reducido de 3Mb por minuto, en palabras más claras, esto significa que la calidad que tendría un video comprimido y codificado con MPEG-4 sería como un 90% de la calidad de un VHS. La velocidad de transmisión para MPEG-4 está entre los 54 a 512 kbps para aplicaciones de video conferencia o video telefonía y arriba de 4 Mbps para aplicaciones de TV y películas. La velocidad necesaria para establecer una comunicación de video y audio aceptables dentro de una transmisión de video conferencia o para el monitoreo de una área en un entorno vehicular y obtener un buen resultado, parte desde los 128 kbps bidireccionales, todos los otros factores como la resolución, los cuadros por segundo dependen de las especificaciones del servicio que se desea prestar. Las combinaciones de protocolos y estándares son muchas: para vídeo MPEG-1, MPEG-2, H.264 más conocido como MPEG-4, H.261, H.263, CIF o QCIF, de 7.5 cps a 30 cps; y para audio G.711, G.728, G.722 o G.723. Por ejemplo en una conferencia múltiple el número de posibles combinaciones de estándares y protocolos es muy alto y puede saturar la red. Muchas redes no son capaces de negociar todas estas variables, forzando a los terminales de los clientes a reducir sus protocolos al más bajo común denominador de todos los participantes, bajando así la calidad del vídeo. Lo anterior debido a que el control de congestión de TCP hace reducir la ventana de transmisión cuando detecta

pérdida de paquetes, y el audio y el video son aplicaciones cuya tasa de transferencia no permite disminuciones de este tipo en la ventana de transmisión.

1.9 PROTOCOLOS COMUNES DE AUDIO Y VIDEO

Aunque existen varios protocolos para la transmisión de video y audio en cuanto a señalización y tiempo real, este aparte se centrará en los más conocidos y usados en el ámbito de las video conferencias y el monitoreo remoto.

1.9.1 Protocolo de Inicio de Sesión

Protocolo de Inicio de Sesión (SIP, *Session Initiation Protocol*), es un protocolo de sesión diseñado por el IETF, inicialmente definido en la Solicitud de Comentarios (RFC) 2543, y que posteriormente fue redefinido en la RFC 3261. Como su propio nombre lo indica, es un protocolo cuyo objetivo consiste en proveer el mecanismo para establecer, modificar, y cancelar una sesión entre dos terminales, así como poder ubicar 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 de la mano con el Protocolo de Descripción de Sesión (SDP [32]), especificado en la RFC 2327, cuyo proceso es precisamente el describir los detalles de la solicitud de conexión, como los códecs a utilizar para los distintos tipos de datos, como audio o vídeo, y los puertos que se especifican para ello. Para transportar los datos en tiempo real, se utilizan los protocolos RTP [33] y Control de Transporte en Tiempo Real (RTCP). SIP es un protocolo del nivel de aplicación para el establecimiento y gestión de sesiones con múltiples participantes y puede ejecutarse sobre el Protocolo de Datagrama de Usuario (UDP) o sobre el Protocolo de Control de Transmisión (TCP).

1.9.2 RTP/RTCP

Los protocolos RTP/RTCP se desarrollaron para dar soporte al transporte de flujos de datos en tiempo real, debido al surgimiento de aplicaciones como la telefonía IP. Estos protocolos son capaces de proporcionar calidad relativamente aceptable a los flujos de datos de tiempo real mediante mecanismos como el control de datagramas descartados en la red, o el control del orden correcto en el reensamble de los mensajes, que son dos de los mecanismos más comunes; al ser protocolos de nivel de aplicación y por las características de tiempo real, los mensajes RTP/RTCP se encapsulan sobre datagramas UDP, lo que da garantía en que los procesos que realizan los protocolos de nivel inferior añaden el mínimo retardo, y no necesariamente se establece una conexión, como ocurre al utilizar TCP. En una sesión RTP, en la cual dos o más terminales de usuario envían y reciben datos entre sí, y utilizan 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 terminales que envía datos se le llama *synchronization source*, y se lo identifica con un único número de 32 bits dentro de la sesión, que se le asigna aleatoriamente; aunque la posibilidad de que dos emisores tengan el mismo número es muy baja, en la propia RFC se contempla este inconveniente y se proporcionan los mecanismos para evitarlo. El puerto RTP se utilizará entonces para el envío de la carga útil y el RTCP en general se utilizará para proporcionar un mecanismo de control dando principalmente realimentación al emisor, tal como se muestra en la figura 1-14.

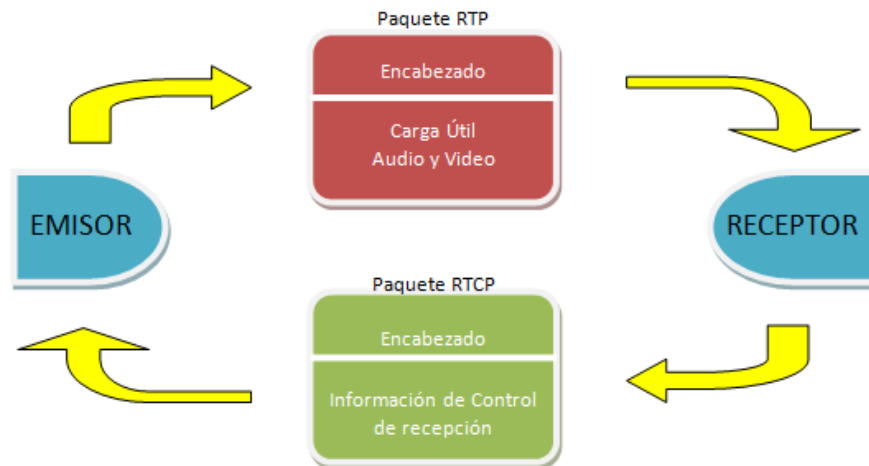


Figura 1-14 Paquetes RTP y RTCP para el control de la calidad en recepción [Por los autores]

1.9.3 Encapsulamiento de Voz y/o Video IP

Una vez que la sesión multimedia se establece, la voz y/o el video se digitalizan y se transmiten a través de la red en paquetes IP.

Los paquetes de voz y/o video primero se encapsulan en RTP, luego en UDP, en paquetes IP y posteriormente en tramas de red de nivel dos. La figura 1-15 muestra este proceso en un ejemplo.

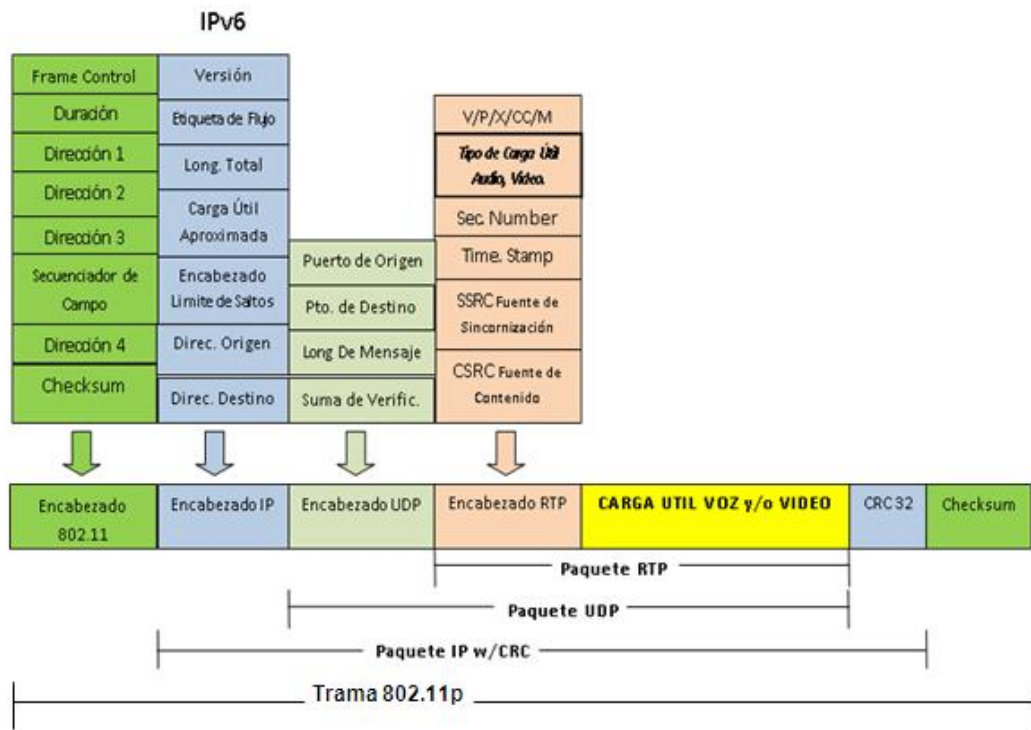


Figura 1-15 Encapsulamiento a nivel 2 de un paquete de Voz y/o Video IP [Por los autores].

2. LAS VANETS, ANÁLISIS BAJO LA NORMA 802.11p Y SU COMPARACIÓN CON EL ESTÁNDAR ORIGINAL

En el capítulo anterior se explicó cómo las redes inalámbricas son una solución eficaz para el intercambio de información, tal como: Datos, Voz o Video IP, omitiendo las interconexiones físicas hacia un *backbone* local; permitiendo varias ventajas tales como la movilidad, flexibilidad, escalabilidad, fácil instalación y una disminución notable en cuanto a costos de instalación y mantenimiento. Las tecnologías inalámbricas están siendo requeridas en un gran número de escenarios como en los ambientes con medios de transporte (VANETs), donde los vehículos son los protagonistas y es en ellos en donde la proliferación de nuevos conjuntos de funcionalidades y servicios ligados a las nuevas tecnologías, está suponiendo un importante cambio en el modelo de negocio, tanto desde el punto de vista de los fabricantes, como desde los proveedores de servicios.

El presente capítulo toma como introducción el concepto general sobre los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, *Intelligent Transportation Systems*) para dar a conocer la necesidad que existe en cuanto al estudio de nuevas tecnologías, que aporten al buen desarrollo del tránsito y transporte en las ciudades y carreteras del mundo. A medida que avance el capítulo, la explicación irá dirigida a mostrar el marco en donde se encuadra el presente trabajo de grado. El objetivo a alcanzar es: dar a conocer el ambiente de las redes VANETS, donde se desarrolla el estándar 802.11p, dar una descripción del estándar 802.11p/WAVE y hacer una comparación entre el estándar 802.11 original y el estándar 802.11p, a nivel MAC, resaltando sus diferencias y ventajas.

2.1 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

Los ITS, conforman un esfuerzo común entre gobiernos, industria privada y centros de investigación, para aplicar las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones en los problemas actuales del transporte mundial [34]. Los objetivos de tales desarrollos son muy diversos [35] [36], pero los principales son los siguientes:

- Maximizar la seguridad de todos los medios de transporte actuales, donde el vehículo por carretera es el más preocupante, debido a que es el causante de la mayoría de las muertes y lesiones que se producen en el transporte mundial.
- Mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte, optimizando los tiempos de viaje y disminuyendo las congestiones.
- Estimular la intermodalidad, utilizando varios medios de transporte para completar un viaje.
- Integrar los medios de transporte en las políticas de desarrollo sostenible; en particular, disminuyendo las emisiones de gases tóxicos de buses de transporte público y vehículos de carga, optimizando el uso de las infraestructuras.
- Mejorar el confort de los pasajeros, con un gran número de servicios de información, servicios de ayuda para toma de decisiones, sistemas de guiado y navegación, etc.

Los problemas que trata ITS son los relativos al transporte marítimo, aéreo y por carretera. El despliegue tecnológico en el transporte marítimo y aéreo se encuentra considerado en gran medida en la actualidad. En este sentido, diversas tecnologías dentro de las radio comunicaciones y la electrónica se encuentran incorporadas en completos sistemas de información en uso actualmente para incrementar su rendimiento. De esta manera, si bien es necesario realizar un amplio estudio sobre cómo ofrecer servicios añadidos para la seguridad y la intermodalidad, es sin embargo, el transporte por carretera el que concentra la mayoría de las preocupaciones de la comunidad ITS. Aquí es precisamente donde se centra la tecnología 802.11p/WAVE que es el campo de estudio del presente trabajo de grado.

La actual demanda de movilidad terrestre ha excedido la capacidad del sistema de carreteras, debido a que éste no puede ser expandido al mismo ritmo, este problema se muestra muy fácilmente en nuestro entorno local, como por ejemplo cuando se forman embotellamientos en las intersecciones urbanas, semáforos o cabinas de peaje y se ve truncado el flujo de vehículos, en algunos casos extendiendo excesivamente el tiempo de viaje, la infraestructura actual debe ser usada de una manera mucho más eficiente para manejar el aumento de la demanda [37]. La congestión de las horas pico en las zonas céntricas de las ciudades colombianas y en las vías de comunicación principales continúa creciendo rápidamente, a la misma velocidad que el descenso de la productividad en la actividad laboral, derivada del uso de vehículos en las ciudades [37].

El incremento en el precio de los combustibles y el daño medioambiental no se han considerado hasta hace dos décadas. Además, y lo que es más importante, los accidentes de tráfico producen más de 1.2 millones de muertes cada año, y alrededor de cuatro veces, esta cantidad de heridos en todo el mundo [32].

Con la intención de brindar alternativas de solución a los crecientes problemas en el transporte por carretera, los ITS pretenden mejorar la eficiencia de la red vial, usando información tanto histórica como en tiempo real sobre el estado del tráfico y de las infraestructuras, para detectar necesidades en los distintos componentes del sistema [37]. Integrando nuevas funcionalidades en el ámbito de los ITS, tanto en el lado de la infraestructura como en el vehículo, es posible reducir los tiempos de viaje, disminuir la frecuencia y severidad de los accidentes, reducir los daños colaterales, y mejorar la satisfacción de los usuarios.

Los ITS implementan sistemas de procesamiento de información avanzada, comunicaciones, sensores, y tecnologías de control para intentar solucionar los problemas del transporte terrestre. Sin embargo, es necesario mantener, e incluso aumentar los recursos invertidos en la investigación y desarrollo para estas tecnologías y para incentivar programas de aplicación real de nuevos avances.

2.1.1 Los ITS en la Carretera

En atención a lo mencionado, este trabajo de grado se centra en la transmisión de Voz, Datos y Video IP bajo la norma IEEE 802.11p, los cuales conforman tecnologías base para el desarrollo de los ITS por carretera, como sistemas de ayuda a emergencias,

sistemas de monitoreo, navegación, sistemas de apoyo para la toma de decisiones, sistemas de información del estado de las vías, etc. Muchos de los inconvenientes y arquitecturas que se presentan en el caso de la carretera son igualmente problemáticos para el resto de los medios de transporte. Sin embargo, las tecnologías involucradas y el conjunto de servicios y aplicaciones en los que se centra la investigación varían. Los principales elementos que se pueden distinguir en los sistemas ITS desarrollados en el entorno del transporte por carretera, se pueden resumir en los mostrados en la figura 2-1 [36]. En ella se pueden observar los tres principales elementos:

1. *Vehículo*: Este conforma la parte principal dentro de la arquitectura ITS, ya que toda la funcionalidad desplegada se centra en la mejora de su circulación y hacen uso de un conjunto de servicios ITS que están destinados a mejorar su seguridad, hacer más eficiente su circulación y ofrecer un confort mejorado.
2. *Infraestructura*: Está formada tanto por el hardware distribuido a lo largo de las carreteras, como por el equipamiento diverso centralizado en los nodos de comunicación. Se sitúan a un lado de la carretera, y principalmente, está formado por sensores de diversa índole, tales como: detectores de paso de vehículos, de temperatura, sistemas de reconocimiento de imágenes, radares de velocidad, radares de detección de las dimensiones de los vehículos, etc. No obstante, el hardware instalado en la carretera que más está ganando interés en los últimos años es el relacionado con las comunicaciones.
3. *Central de Servicios*: La finalidad de la central de servicios es disponer de las aplicaciones finales. Los servicios que se encuentran en este nivel pueden estar orientados a la gestión centralizada, como es el caso de los sistemas de monitoreo y seguimiento, o destinados a la provisión de funcionalidades a los vehículos, como serán los servicios de información de tráfico o de gestión de reservas de parqueaderos, etc.

Aparte de la típica estructura cliente/servidor que se puede observar en la arquitectura descrita en la figura 2-1, los vehículos pueden ser terminales que acceden a servicios ofrecidos desde la central o implementar aplicaciones sin la intervención incluso de la infraestructura; además las últimas generaciones en tecnologías de comunicación inalámbricas permiten el despliegue de una mayor cantidad de servicios que pueden estar tanto del lado de la infraestructura o bien en el vehículo.

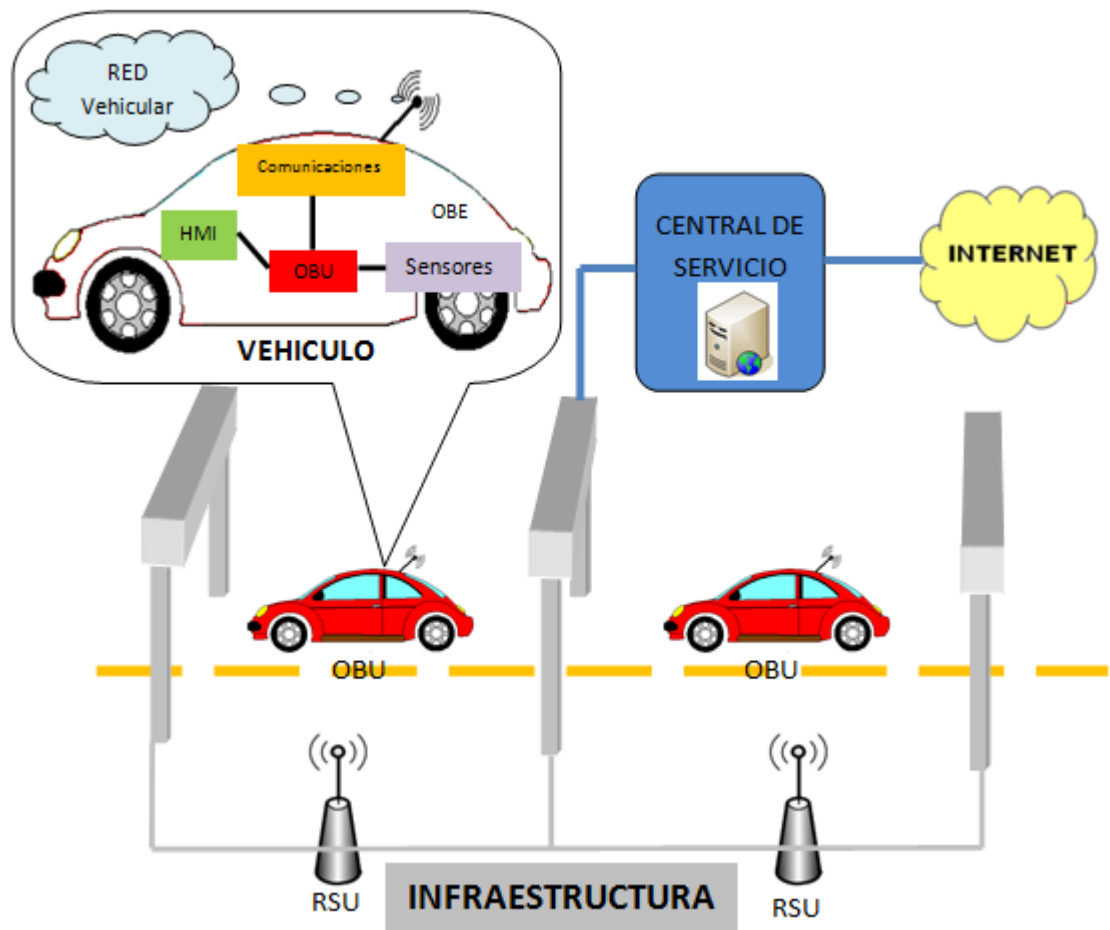


Figura 2-1 Sistema ITS en Carretera [Por los autores].

Los operadores de telecomunicaciones han realizado una gran inversión en los últimos años, en tecnologías de comunicación de corto alcance que se están implantando en muchos entornos como por ejemplo en sistemas de peaje electrónico, pues, los dispositivos de comunicación forman una parte importante del despliegue actual de la infraestructura de la carretera [5]. También se consideran las tradicionales redes Wi-Fi y su evolución en el entorno vehicular, WAVE, que han alentado a la comunidad científica a ofrecer sistemas de comunicación directa entre vehículos [38].

Los vehículos presentan, un volumen de despliegue muy grande. La definición de su arquitectura de cara a afrontar los nuevos servicios ITS es muy importante. Debido a esto, es importante considerar los principales elementos que constituyen el equipamiento de abordo (OBE, *on-board equipment*), de los vehículos "inteligentes" actuales; existe una gran variedad de sensores que se han usado en distintos ámbitos de las ITS para el caso del vehículo, de tal manera que se disponga de información sobre su estado y del entorno circundante. Los sensores normales, como los tacómetros, sensores de temperatura, de presión en los asientos, de puertas abiertas, de cinturón asegurado, etc., están dejando paso a otro conjunto de sensores de nueva generación. Sistemas de seguridad como el

ABS (*Anti-lock Braking System*) o el ESP (*Electronic Stability Control*) ya implican un nuevo conjunto de detectores que monitorizan la dinámica del vehículo. Sin embargo, los elementos que mayor interés tienen para la comunidad ITS son los de navegación y el equipamiento de dispositivos de telecomunicaciones Inalámbricas [39].

Los *Transceivers*⁵ de comunicación inalámbrica, son unos de los principales componentes hardware de los vehículos del futuro, pues, estos componentes amplían la percepción del conductor y la información ofrecida por la sensorización de abordo con nuevos servicios, mediante el uso de las redes de comunicación de datos [40].

Como se observa en la figura 2-1, el hardware de comunicación permite conectar el vehículo a la red WAVE, la cual puede entablarse bien a través de una conexión fija o esporádica con la infraestructura, o bien entre los propios vehículos directamente. Además, todos los datos recibidos desde los sensores o desde las interfaces de comunicación del vehículo deben ser procesados. La unidad de a bordo (OBU, *On Board Unit*), es la encargada de tal tarea, además de muchas otras. Generalmente, se tiene un computador embebido para realizar la tarea de gestionar la información de los sensores, y actuar en consecuencia a ello.

Sin embargo, cada vez más se están considerando computadores de propósito general que complementan a los mecanismos de solución, de apoyo como los frenos ABS o el control de descenso y otros, ya instalados en el vehículo. De esta manera, las arquitecturas PC de propósito general se extienden en gran medida en el campo de los ITS [4] [41]. En dichos sistemas de abordo, es posible incluir el software necesario para ofrecer una arquitectura escalable, así como para ofrecer servicios que requieran de las comunicaciones con el exterior. Dicho computador de a bordo suele estar ligado a un componente hardware/software de interfaz con el usuario (HMI, *Human Machine Interface*), de forma que el usuario pueda interactuar debidamente con las aplicaciones de la OBU. Las comunicaciones en ambientes vehiculares y la viabilidad de la transmisión de servicios como los de Voz y Video IP, son elementos fundamentales de este trabajo de grado. Estos son estudiados en cuanto a su viabilidad dentro de la norma IEEE 802.11p en un entorno WAVE.

2.1.2 ITS, Investigación y Desarrollo

Los mayores avances de los sistemas OBU de hoy en día son fruto de la investigación privada a lo largo de muchos años. No obstante, cuando la finalidad de un conjunto de aplicaciones implica una preocupación general (como es el caso de la seguridad), cuando el sistema a desplegar presenta una interdependencia con las infraestructuras públicas, o cuando es necesario establecer mecanismos reguladores, la financiación pública en programas de investigación y desarrollo se hace especialmente necesaria; por lo tanto se crean programas gubernamentales en todo el mundo.

⁵ Dispositivo que sirve de interfaz con el medio de transmisión y que tiene la capacidad de transmitir y recibir información en forma simultánea o no.

Teniendo en cuenta el párrafo anterior, no solo las grandes potencias como Estados Unidos, Europa y Japón se preocupan por participar en el desarrollo de nuevas tecnologías en los sistemas del OBU, en Colombia existe el interés particular por el desarrollo del transporte en el país y existen organizaciones como ITS Colombia [28], quienes se preocupan por éste entorno.

Entre algunos ejemplos de entidades en el mundo están: el Departamento de Transportes de Estados Unidos, que actualmente está involucrado en diversos proyectos de mejora generalizada de la calidad y de la seguridad en el transporte por carretera. Sin embargo, existen programas ITS específicos de gran importancia. En California, el programa PATH [42] involucra un amplio grupo multidisciplinario que trabaja para mejorar la seguridad y la eficiencia del transporte, considerando las nuevas tecnologías y las implicaciones políticas y económicas. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (DARPA, *Defense Advanced Research Projects Agency*), incluye también diversos proyectos relacionadas con el transporte.

En el caso europeo, hay muchas iniciativas gubernamentales para la investigación en ITS. Los Programas Marco de la Comisión Europea han incluido en los últimos años una gran cantidad de proyectos relacionados con los vehículos, como el proyecto CARTALK, que sentó las bases futuras en los sistemas de comunicación vehículo a vehículo para mejorar la seguridad. En el caso de Japón, al igual que en el de Estados Unidos, existe una sección gubernamental involucrada en la investigación en ITS, denominada *Japanese ITS R&D Division*, que ha realizado diversos avances dentro de la prevención de colisiones mediante tecnologías de comunicación DSRC (*Dedicated Short Range Communications*), y tienen como una de sus bases futuras a la norma IEEE 802.11p [43].

2.2 VANETS

Las Redes Ad Hoc Vehiculares (VANETS, *Vehicular Ad Hoc Networks*), también llamadas Redes de Comunicaciones Vehículo a Vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle Communication*) o Redes de Comunicación Inter-Vehicular (IVC, *Inter-Vehicle Communication*), se pueden considerar como un caso específico de las MANET tradicionales. En las VANETS, los nodos móviles son los vehículos, y debido a su alta movilidad y velocidad, las principales complicaciones provienen de los cambios frecuentes y rápidos de topología de red; pero, por el contrario también existen algunos aspectos que contribuyen a facilitar la implantación de estas redes, ya que los vehículos en una VANET sólo se mueven en carreteras predeterminadas, además no se tiene el problema de la limitación de recursos en términos de almacenamiento de datos y poder. Por otra parte, se puede asumir que siempre es posible obtener la posición geográfica del vehículo mediante el uso de GPS, que puede proporcionar sincronización a través de la red.

A continuación se muestran un conjunto de tecnologías inalámbricas susceptibles de ser utilizadas por las VANETS y sus características principales:

- **Wi-Fi.** Basado en el estándar IEEE 802.11, principalmente opera en las bandas libres. Las versiones a, b y g se han extendido mucho hasta el punto de que la mayoría de los equipos portátiles y PDAs las traen incorporadas desde su fabricación en serie, tienen un

alcance de algunos cientos de metros y un ancho de banda de hasta 54 Mbps. Aunque existe super g que aumenta la velocidad hasta 108 Mbps y 802.11n que aumenta la cobertura considerablemente y podría llegar a tasas de hasta 500 Mbps, estas versiones aún están pensadas para equipos estáticos o nómadas, más no para ambientes continuamente cambiantes.

- **WiMAX.** Basada en el estándar IEEE 802.16 puede operar en bandas con o sin licencia. Proporciona tasas de transferencia de hasta 75 Mbps con rangos de cobertura de hasta 50 Km. La variante 802.16e soporta movilidad. El aspecto de la seguridad está bien resuelto gracias al control de acceso basado en 802.1X y EAP (*Extensible Authentication Protocol*) y al cifrado AES (*Advanced Encryption Standard*). Soporta calidad de servicio de forma nativa.

- **Bluetooth.** También conocido como 802.15.1. Es la tecnología más extendida en cuanto a comunicaciones inalámbricas personales (WPAN). Hay varias clases dependiendo de su alcance y consumo de potencia, alcanzando tasas de 2 Mbps y rangos de hasta 100 m. Opera en banda libre y sus mecanismos de seguridad son suficientemente robustos.

- **UWB.** *Ultra Wide Band* es un estándar basado en 802.15.3 que funciona emitiendo a muy baja potencia en un espectro amplio. Su alcance es muy limitado (<10m) pero proporciona tasas de transferencia elevadas llegando a los 480 Mbps. Su consumo de energía es muy reducido.

- **ZigBee.** Es la tecnología más utilizada actualmente en redes de sensores *Ad Hoc*. Se basa en el estándar 802.15.4. Presenta anchos de banda muy pequeños y coberturas reducidas (250 Kbps hasta 75m). Es de gran utilidad para enviar poca información en pequeñas distancias. La gran ventaja es que su consumo es extremadamente reducido.

- **802.11s.** Se pretende que sea un estándar sobre "*Mesh Networking*". Especifica una extensión a la capa MAC del IEEE 802.11 para resolver el problema de la interoperabilidad de muchos nodos de forma eficiente. Define una arquitectura y un protocolo para soportar comunicaciones unicast, broadcast y multicast sobre topologías multi-hop usando métricas a nivel radio.

En las VANETS se necesitan protocolos MAC que subsanen los problemas existentes en los cambios rápidos de topología [44], así también se debe tener en cuenta los diferentes tipos de aplicaciones para las que se estableció la transmisión, como aspectos más importantes que las limitaciones de potencia y los problemas de sincronización. Por otra parte, los protocolos MAC han de reducir el tiempo de retardo de acceso al medio, que es importante, por ejemplo, para aplicaciones de seguridad.

Las principales aplicaciones para las VANETS son las relacionadas con seguridad y advertencia, es decir, el conjunto de herramientas hardware/software capaces de prevenir

accidentes en vez de actuar sobre los vehículos implicados en accidentes. Como un ejemplo, las comunicaciones carro a carro (V2V), estas comunicaciones pueden informar a los conductores acerca de las intersecciones, sobre otros vehículos aproximándose desde distintas direcciones o giros peligrosos, como se puede dar en un entorno vehicular según la figura 2-2. En general, la cantidad de información a transmitir es relativamente pequeña (por ejemplo, la información sobre el movimiento de cada vehículo), pero la fiabilidad de transmisión, así como el retardo y la difusión de paquetes son fundamentales.

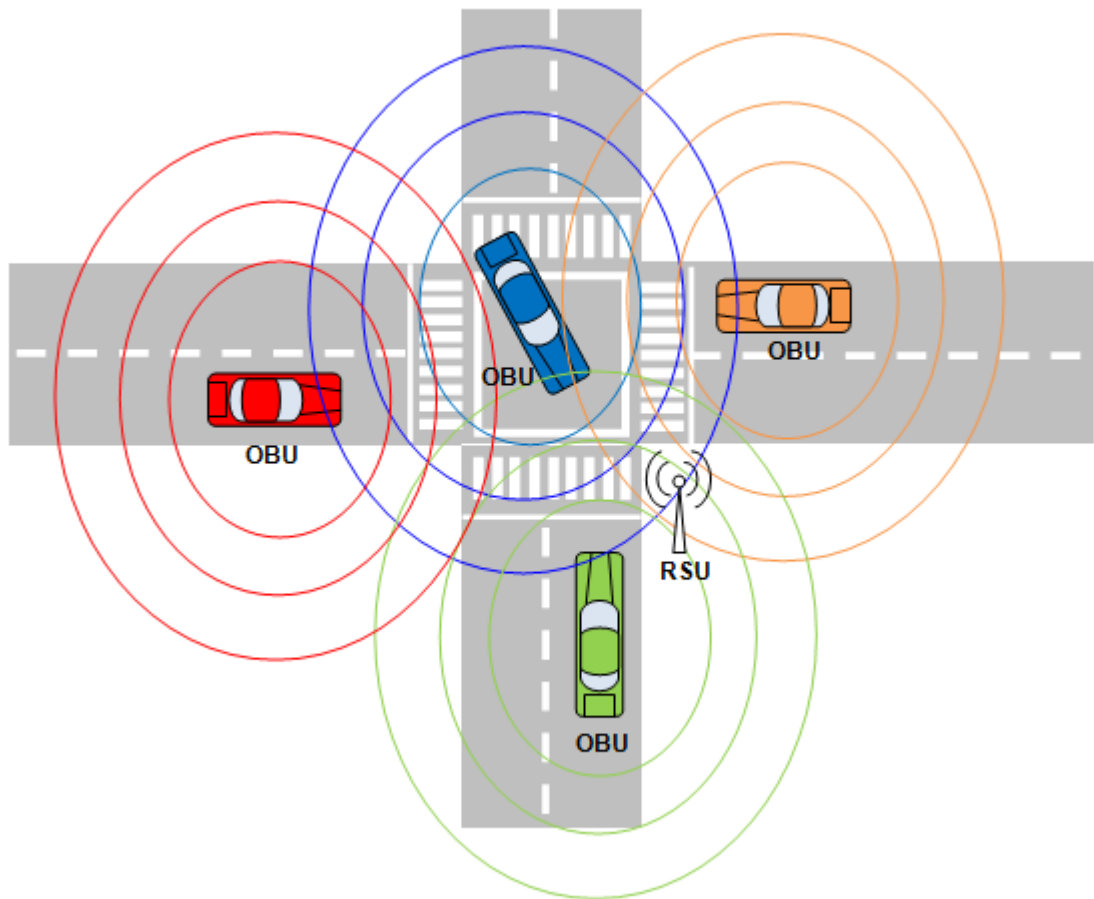


Figura 2-2 Ejemplo de Entorno Vehicular [Por los autores]

2.3 ESTÁNDAR IEEE 802.11

Este estándar es creado con el objetivo de suministrar una alternativa apta para establecer conexiones inalámbricas a estaciones de trabajo o a sistemas automáticos que necesiten extenderse más allá de su infraestructura física en forma ágil y rápida. Esta tecnología puede ser usada en equipos portátiles o equipos montados en vehículos dentro de un área local. Este estándar también ofrece a los organismos reguladores, un medio

para definir la forma de acceso de una o más bandas de frecuencia para la comunicación en un área local.

El IEEE en el estándar 802.11 [10] describe los protocolos de comunicación y la compatibilidad que deben tener los equipos de interconexión, para una comunicación de datos a través del aire, como medio conductor, siendo por señales de radio o señales de infrarrojo, dentro de una red de área local (LAN), donde se utilizaría un protocolo de acceso múltiple (CSMA/CA). El nivel MAC o control de acceso al medio, admite control entre estaciones independientes.

El IEEE 802.11 se aprobó originalmente en el año de 1997 y en él se definen dos tipos de interfaces físicas: la interfaz infrarroja que llega a velocidades de 1 Mbps con un despliegue opcional de 2 Mbps, y una interface de radio en la que se define un mecanismo de Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*) que soporta velocidades de datos de 1 Mbps y 2 Mbps (opcional) o un mecanismo de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) que soporta velocidades de datos de 1 y 2 Mbps. Aunque la interfaz infrarroja sigue siendo parte del estándar no hay implementaciones disponibles [45] y en las últimas actualizaciones ha desaparecido [10], se lo conoce como 802.11 Legacy.

Desde que el estándar se creó hasta la actualidad, muchos grupos de trabajo se han originado 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 base que el estándar original y la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). 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.

Más adelante, 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. También se esta introducción la especificación 802.11n.

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 HotSpots⁶, proporcionando cobertura del rango de cientos de metros. En los últimos años se ha producido una gran actividad de investigación en torno a la tecnología de las redes inalámbricas móviles, como el estándar IEEE 802.11p que 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 redes en entornos vehiculares. Por tal razón, muchos fabricantes de varias marcas de autos ya comenzaron a equipar sus vehículos con sus propias soluciones comerciales, antes de la publicación de la especificación final del estándar que busca dar soporte a un escenario que requiere mayor atención.

Como se estudiará de manera más detallada en las posteriores secciones del presente Capítulo, el estándar IEEE 802.11p/WAVE ofrece la flexibilidad requerida para satisfacer los requerimientos de los ambientes vehiculares, como los de carreteras, urbanos y rurales, con lo cual se brinda apoyo a sistemas de seguridad pública y aplicaciones de prevención de accidentes. El enfoque de este Capítulo se centra en el estándar 802.11p y hace referencia al estándar original, para de esta forma explicar el enrutamiento e interconexión a nivel MAC.

2.4 ESTÁNDAR IEEE 802.11p/WAVE

La frecuencia de 5,9 GHz dedicada para comunicaciones inalámbricas de corto alcance en el acceso en entornos vehiculares (DSRC/WAVE, ahora en adelante simplemente WAVE), tal como se especifica en una serie de normas, como en las generadas por el Grupo de trabajo IEEE P1609, permite comunicaciones inalámbricas vehículo a vehículo (V2V), y vehículo a infraestructura (V2I). Esta conectividad permite una amplia gama de aplicaciones que dependen de las comunicaciones entre usuarios de la carretera, incluyendo la seguridad del vehículo, la seguridad pública, gestión de flotas comerciales, de peaje, y otras operaciones.

Antes de explicar el funcionamiento de la norma IEEE 802.11p/WAVE con mayor profundidad, es necesario que el lector tenga en cuenta la definición de las entidades principales que interactúan dentro de las comunicaciones y de la red en sí misma, es por ello que se dará una explicación general de estas entidades o unidades:

- **Unidad Abordo (OBU):** Son dispositivos que puede funcionar en movimiento y apoyar el intercambio de información con las RSUs y otros OBUs. Las OBU están inmersas en los vehículos, un ejemplo es la figura 2-3, aunque también puede estar de forma portátil en dispositivos de mano o en computadores personales. Las OBUs pueden operar en vehículos privados y por lo general son los que reciben los servicios provistos por las RSUs, pero pueden ser proveedores de servicios en determinados casos.

⁶ Un *hotspot* (en inglés “punto caliente”) es una zona de cobertura Wi-Fi, en el que un punto de acceso o varios proveen servicios de red a través de un Proveedor de Servicios de Internet Inalámbrico. Este servicio permite mantenerse conectado a Internet en lugares públicos.

- **Unidad de Seguridad Pública de a Bordo (PSOBU, Public Security On Board Unit):** Son un caso especial de unidad de las OBU's normales, componen una red de nodos integrados en los vehículos de seguridad pública. Estos nodos están predispuestos por las autoridades competentes para operar, en forma particular, en aplicaciones de seguridad pública, priorizando el tráfico de la información o señal.
- **Equipamiento de Abordo (OBE):** Esta conformado por los dispositivos de medición, interconexión, censado y almacenamiento, los cuales dan soporte al OBU para la prestación de servicios y su interacción con el usuario final.
- **Unidad al Lado de la Carretera (RSU):** Son dispositivos que funcionan sólo en estado estático cuando se requiere el intercambio de información que apoya a las OBU's. Las RSUs están inmersas en los elementos de infraestructura tales como señales de tráfico y postas de alumbrado público, que podrán ser trasladadas de un sitio a otro, pero no operan cuando están en movimiento. Los proveedores de información usualmente están en las RSU. Las RSU se encuentran en sitios específicos y con su respectiva licencia y puede prestar servicios en uno o más canales de servicio.

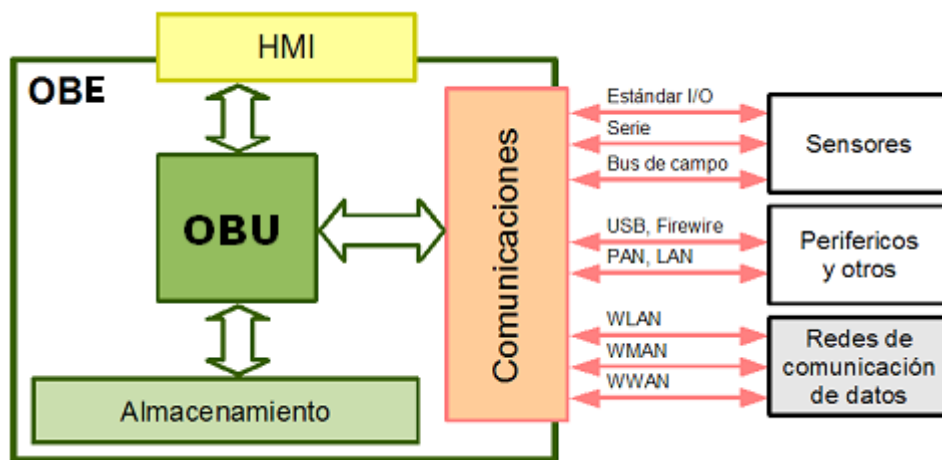


Figura 2-3 Ejemplo de Arquitectura Exterior del OBU. Por los autores basada en [40].

2.4.1 WAVE

Es la propuesta de la IEEE para un sistema estándar de comunicación vehicular. WAVE es una pila de protocolos [46] que tiene soporte para tráfico TCP/IP, así como protocolos de transporte, red y de aplicación, ver figura 2-4 [44]. Además del soporte para TCP / IP, se compone de IEEE 1609.1, IEEE 1609.2, IEEE 1609.3, IEEE 1609.4, y de IEEE 802.11p.

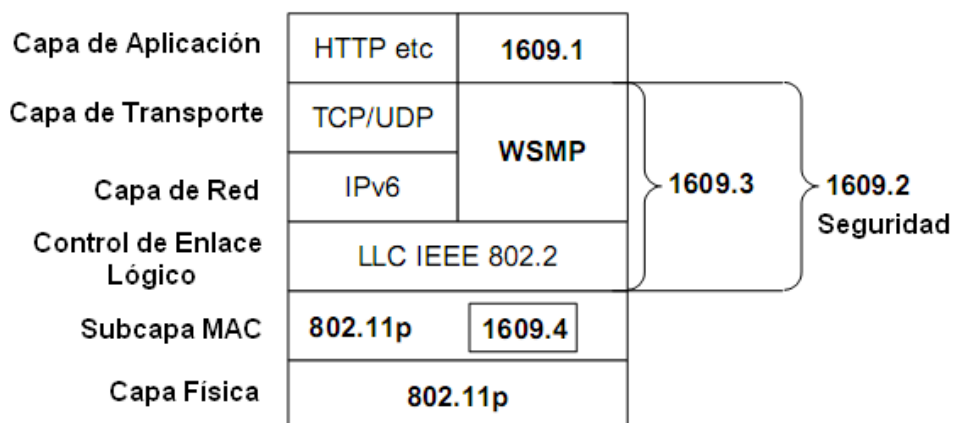


Figura 2-4 Visión General de la Pila de Protocolos WAVE [44]

2.4.1.1 Norma 1609.1 [47]

En esta norma se especifica la aplicación conocida con el nombre de Administrador de Recursos (RM, *Resource Manager*), para el acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE) dedicado a comunicaciones de corto alcance (DSRC), el RM se diseñó para permitir que aplicaciones en sitios remotos puedan comunicarse con los dispositivos de las OBU, que se instalan en los vehículos, a través de dispositivos conocidos como unidades en carretera (RSU), que se instalan al lado del camino. El RM WAVE, actúa en la capa de aplicación, multiplexando las comunicaciones de muchas aplicaciones remotas, cada comunicación con múltiples OBU. El propósito de la comunicación es llevar a cabo el intercambio de información necesaria para los requisitos de las aplicaciones remotas WAVE DSRC.

El propósito de esta norma es permitir la completa interoperabilidad entre aplicaciones que utilizan WAVE, de manera que se simplifiquen los sistemas a bordo del vehículo, reduciendo los costos y mejorando el rendimiento.

La presente norma tiene por objeto permitir una amplia gama de aplicaciones con el apoyo de las OBU con los más bajos costos posibles. El bajo costo está calculado de tal forma que se elimine la necesidad de interpretar los mensajes de solicitud en las OBU. No hay ningún software OBU que represente las aplicaciones que utiliza la RM; por lo que el procesamiento, la memoria y los requisitos de gestión de la configuración se eliminan de la OBU. En lugar de poner esos requisitos de procesamiento en la OBU, se ponen dentro del RSU o en un procesador de aplicaciones remoto a través de la RSU. El único procesamiento requerido es el intérprete de comandos específicos y el encabezado de los mensajes que define la norma, que es una aplicación independiente. La OBU simplemente sirve como un buzón móvil para llevar los mensajes de solicitud y datos de un RSU a otro o como un punto de interfaz común para transferir datos a otros sistemas en los vehículos.

La norma dice, que el RM, puede estar, por ejemplo, en la RSU, y su igual conocido como el procesador de comandos de recursos (RCP, *Resource Command Processor*), puede estar en el OBU. Además las otras aplicaciones, conocidas como aplicaciones de administrador de recursos (RMA, *Resource Manager Applications*), pueden comunicarse con RCP a través del RM. La norma también describe cómo las solicitudes multiplexadas RM de RMAs múltiples, cada una de los cuales se comunica con múltiples OBUs sedes de una RCP. El propósito de la comunicación consiste en proporcionar el acceso RMA a los "recursos", como la memoria, interfaces de usuario, y las interfaces con otros equipos del vehículo controladas por el RCP, de manera compatible e interoperable, y oportuna para cumplir los requisitos de RMA.

El RM utiliza el concepto de toda comunicación, que se inicia desde una entidad conocida como, el proveedor, que emite solicitudes a una entidad de usuario, que sólo responde a las peticiones que recibe. Dentro de esta norma, el RM es el proveedor de un servicio, y el RCP es el usuario del servicio. Cualquiera de las RSUs u OBUs puede operar como proveedor, es decir, cualquier tipo de dispositivo puede alojar el RM.

En general, las RMAs se comunican con una o más RMs en una red segura por cable, mientras que una RM se comunica con una RCP inalámbricamente y donde la seguridad no siempre está presente. La RM multiplexa las sesiones de comunicación de múltiples RMAs de una manera que permite a cada RMA comunicarse de extremo a extremo con RCPs, como se ilustra en la figura 2-5 [47]. Para simplificar, esta figura muestra la RM en una RSU como parte del entorno de la carretera, pero la RM también puede estar en una OBU.

El alcance de esta norma tiene por objeto determinar los servicios y las interfaces de la RM WAVE, incluidos los mecanismos de protección para la seguridad y la privacidad, aplicable y disponible para todos los usuarios de DSRC y operaciones WAVE en la banda de 5,9 GHz autorizado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, Federal Communications Commission) para los sistemas de transporte inteligentes (ITS).

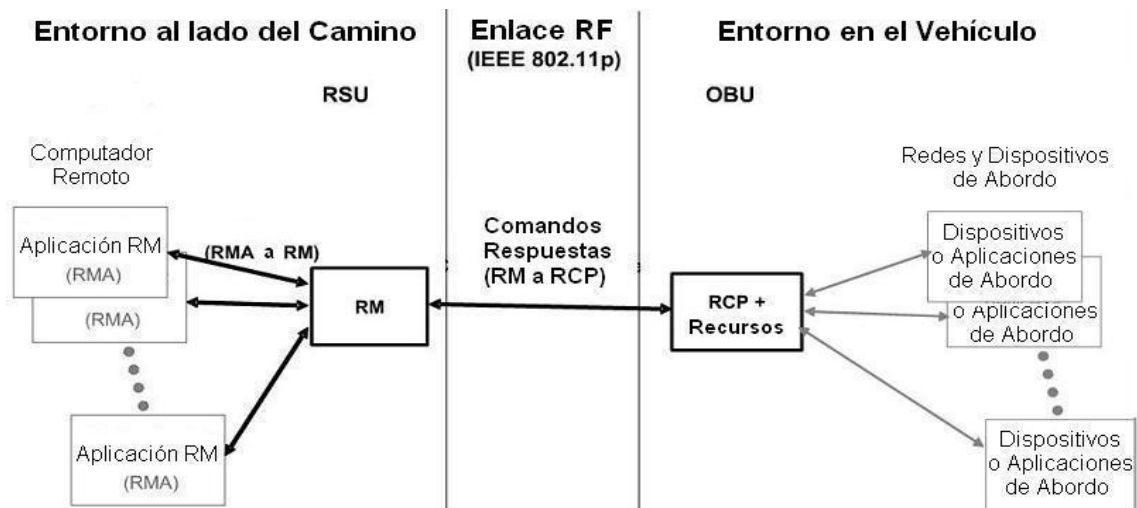


Figura 2-5 Especificaciones de IEEE 1609.1 [47]

2.4.1.2 Norma 1609.2 [48]

En WAVE se definen los formatos de mensajes, para que sean seguros, y su procesamiento. La norma contempla los métodos para asegurar la gestión de los mensajes y su aplicación, con la excepción de los vehículos que originan mensajes de seguridad. También se describen las funciones administrativas necesarias para apoyar las funciones de seguridad esenciales.

Con mayor número de comunicaciones se aumentan los riesgos, y la naturaleza de la seguridad, punto crítico de muchas aplicaciones WAVE; es fundamental que entre los servicios que se dispone se especifique cómo se pueden utilizar para proteger los mensajes de los ataques como espionaje, falsificación, alteración y reproducción. Además, el hecho de que la tecnología inalámbrica se desplegará en vehículos personales, cuyos propietarios tienen el derecho a la intimidad, significa que en la medida de lo posible, los servicios de seguridad deben hacer respetar ese derecho, restringiendo asociaciones, identificaciones no autorizadas y el intercambio de información.

Con esto en mente, se desarrollan normas para las técnicas de seguridad que se utilizarán para proteger los servicios que se prestan sobre esta pila de red; las aplicaciones sobre WAVE se enfrentan a dificultades únicas. Muchas de ellas, en particular las aplicaciones de seguridad, son de tiempo crítico: el tratamiento y los gastos generales de ancho de banda por motivos de seguridad deben mantenerse al mínimo, para mejorar la capacidad de respuesta y disminuir la probabilidad de pérdida de paquetes. Para muchas aplicaciones, la audiencia potencial se compone de todos los vehículos en circulación, por lo tanto, el mecanismo utilizado para autenticar los mensajes debe ser lo más flexible y escalable como sea posible, y debe adaptarse a la eliminación suave de las unidades comprometidas en el sistema. Además, como se mencionó anteriormente, la privacidad en los vehículos debe ser respetada en la medida que sea técnica y administrativamente viable. Los servicios incluyen un cifrado, y una autenticación explícita, nunca anónima.

2.4.1.3 Norma 1609.3 [49]

La Norma establece los servicios de red que proporcionan los dispositivos y sistemas WAVE. Representa aproximadamente la capa 3 y 4 del modelo OSI y también los elementos del modelo de Internet como IP, UDP, TCP. Los servicios prestados incluyen la gestión de datos, dentro de los dispositivos WAVE. Es así como el objetivo de la norma, se centra principalmente en las capas de red y transporte en apoyo a la conectividad inalámbrica entre los dispositivos basados en la frecuencia de 5,9 GHz de DSRC/WAVE.

El propósito de esta norma es proporcionar servicios de direccionamiento y enrutamiento dentro de un sistema WAVE, lo cual permite múltiples pilas de capas superiores por encima de los servicios de red WAVE y múltiples capas inferiores por debajo de los servicios de red WAVE. El soporte a las capas superiores se incluye en las aplicaciones a bordo de vehículos para ofrecer seguridad y comodidad a sus usuarios.

El sistema descrito en esta norma apoya altas tasas, comunicaciones de baja latencia entre dispositivos WAVE. El tráfico genérico está soportado en IPv6 y también en un servicio especializado de mensajes cortos. Además, existe un canal de control, que es el encargado de proporcionar la señalización, los datos IP de cada aplicación se limitan a ser enviados por los canales de servicio disponibles. Muchas aplicaciones se pueden beneficiar de las comunicaciones WAVE que puede residir en los dispositivos WAVE, o residir en los dispositivos genéricos que se encuentren en otras redes conectadas a estos dispositivos.

2.4.1.4 Norma 1609.4 [44]

Esta norma describe las operaciones multicanal del enlace inalámbrico, en modo WAVE, también el control de acceso al medio (MAC) y la capa física (PHY), incluido el funcionamiento y los intervalos de tiempo del canal de control (CCH) y del canal de servicio (SCH), los parámetros para el acceso prioritario, la conmutación de canal y el enrutamiento, servicios de gestión, y las primitivas diseñadas para operaciones multi-canal.

El propósito de esta norma es habilitar mecanismos eficaces que controlan el funcionamiento de las capas superiores a través de múltiples canales, sin necesidad del conocimiento de los parámetros de la capa física (PHY), y describir el canal de operación multi-canal de enrutamiento y conmutación para diferentes escenarios. Igualmente la norma define el espacio de acción como el espacio en el que un dispositivo WAVE pueda comunicarse con otro dispositivo. A medida que estos dispositivos pueden tener diferentes gamas de zona de funcionamiento, la zona de comunicación se limita a la gama más pequeña de funcionamiento de los dispositivos involucrados.

2.4.1.5 Aplicabilidad

Los dispositivos pueden ser móviles, portátiles o estacionarios, los protocolos WAVE son compatibles con las comunicaciones inalámbricas entre todas las clases de equipamientos, también se incluyen los vehículos que operan a altas velocidades como

los que se encuentran en carreteras abiertas. Una característica común de los sistemas WAVE es la necesidad de comunicaciones de latencia extremadamente baja (medida en milisegundos), desde el primer encuentro con un dispositivo que proporcione servicios, hasta completar una transferencia de datos exitosa.

Esta norma es coherente con las comunicaciones entre el vehículo a los equipos de carretera y también con las comunicaciones de vehículo a vehículo, puesto que necesitan de varias arquitecturas ITS. Su propósito es garantizar la interoperabilidad, la seguridad y las comunicaciones de seguridad pública, entre los dispositivos WAVE.

2.4.2 IEEE 802.11p

En atención a todo lo descrito, y teniendo en cuenta las tecnologías referidas en la sección 2.2, las cuales se diseñaron para un fin distinto de las comunicaciones entre nodos inalámbricos con rápidos cambios de topología, se crea la necesidad de tratar de solucionar estos problemas y por tanto se conformó un grupo de trabajo en el IEEE con el objetivo de crear un estándar para las comunicaciones entre vehículos. Esta tecnología es WAVE [16], también conocida como IEEE 802.11p.

La enmienda, IEEE 802.11p, actualiza y expande el estándar IEEE 802.11a con modificaciones a nivel físico y MAC para mejorar su comportamiento en el entorno cambiante como lo es el vehicular. Al igual que IEEE 802.11a, IEEE802.11p utiliza OFDM, pero con tasas de transmisión de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, y 27 Mbps en canales de 10 MHz, aunque puede alcanzar tasas hasta de 54 Mbps con canales de 20 Mhz [50]. Utiliza 52 sub-portadoras moduladas utilizando BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM así como codificaciones de tasas 1/2, 2/3, o 3/4. Como se describe en la tabla 2-1[51].

Tabla 2-1 IEEE802.11p Tasas de Transferencia.

Tasa de Transmisión Mbit/s	Modulación	Tasa de Codificación
3	BPSK	1/2
4,5	BPSK	3/4
6	QPSK	1/2
9	QPSK	3/4
12	16-QAM	1/2
18	16-QAM	3/4
24	64-QAM	2/3
27	64-QAM	3/4

Respecto al manejo de canales, la norma define 7 canales no solapados de 10MHz en la banda de los 5.9GHz: 6 canales de servicio (SCH, *Service Channel*) y uno de control

(CCH, *Control Channel*). Para una mejor comprensión obsérvese el diagrama según la figura 2-6 [44].

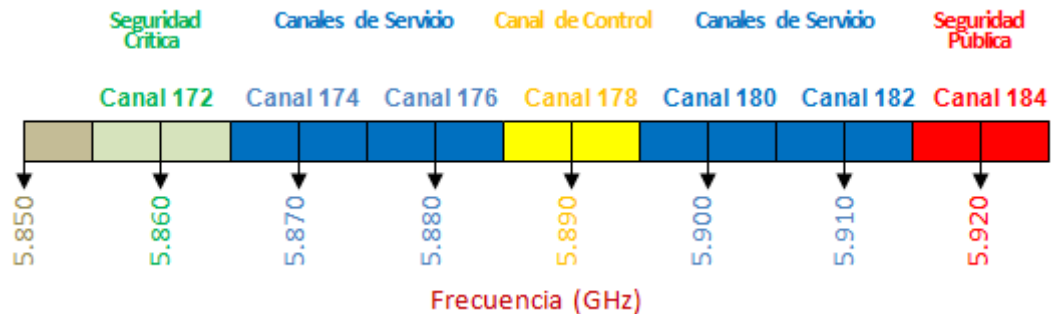


Figura 2-6 Estructura del Espectro en 802.11p [44]

El CCH se utiliza como canal de referencia para realizar una primera detección de los vehículos cercanos como paso previo al establecimiento de las comunicaciones. Al mismo tiempo, dicho canal permite anunciar los servicios disponibles en los canales SCH (acceso a Internet, descarga de contenidos, etc.). Teniendo en cuenta que el canal CCH es el canal de referencia, IEEE802.11p lo emplea para la transmisión en modo *broadcast* de mensajes de seguridad vial. Por la importancia de los mensajes que se transmiten y la necesidad de garantizar su correcta recepción, el canal CCH puede transmitir con una tasa de datos de 6 Mbps, correspondiente a una modulación QPSK con una tasa de codificación de 1/2.

A diferencia de las comunicaciones en la banda de 2 GHz, cuya utilización está asociada a las redes Wi-Fi y Bluetooth [52], la banda utilizada por IEEE802.11p para los sistemas ITS requiere licencia para su uso.

La norma IEEE802.11 es una de las bases para la implantación del nivel físico propuesto por el DSRC. Por lo dispuesto en DSRC, 802.11p se estructura en supertramas de duración de 100 ms, previamente determinadas. Cada intervalo de tiempo va asociado a una supertrama que se divide asimismo en dos segmentos cada uno de los cuales se dedica a un aspecto particular de la comunicación (refiérase a la figura 2-7 [53]).

El primero está dedicado al CCH (canal de control), cuya duración por defecto es de 50 ms y que se encarga del envío de información importante, normalmente relacionada con la seguridad en la conducción, así como de la administración en la formación de grupos de entidades vehiculares según una aplicación determinada (subredes de ámbito específico). El segundo es el SCH (canal de servicio), compuesto por la multiplexación temporal cada 100 ms de canales que operan a distintas frecuencias dentro de su rango, según figura 2-8 [48]. SCH permite la transmisión de datos de información relacionada con seguridad, entretenimiento, administración remota y también se podría usar para transferir Voz y Video a través de paquetes IP.

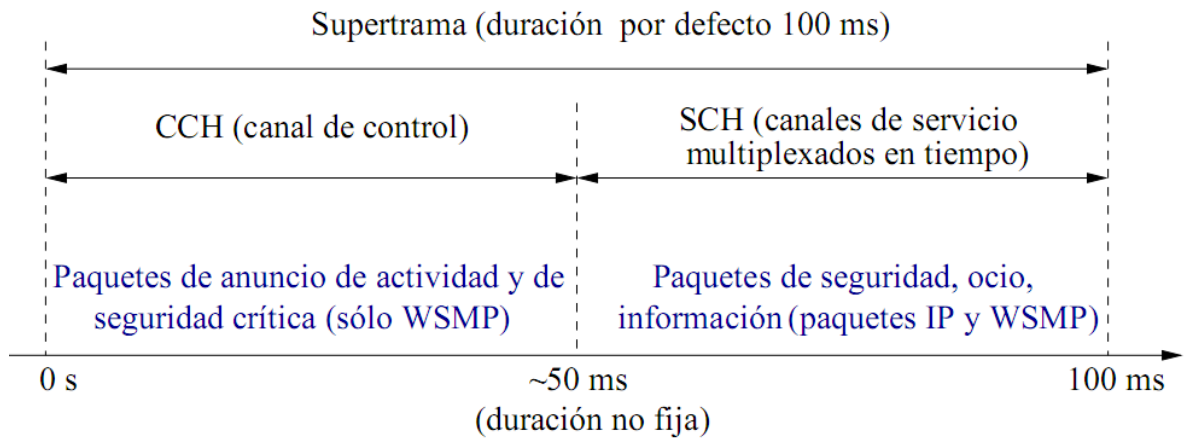


Figura 2-7 Supertrama en 802.11p [53]

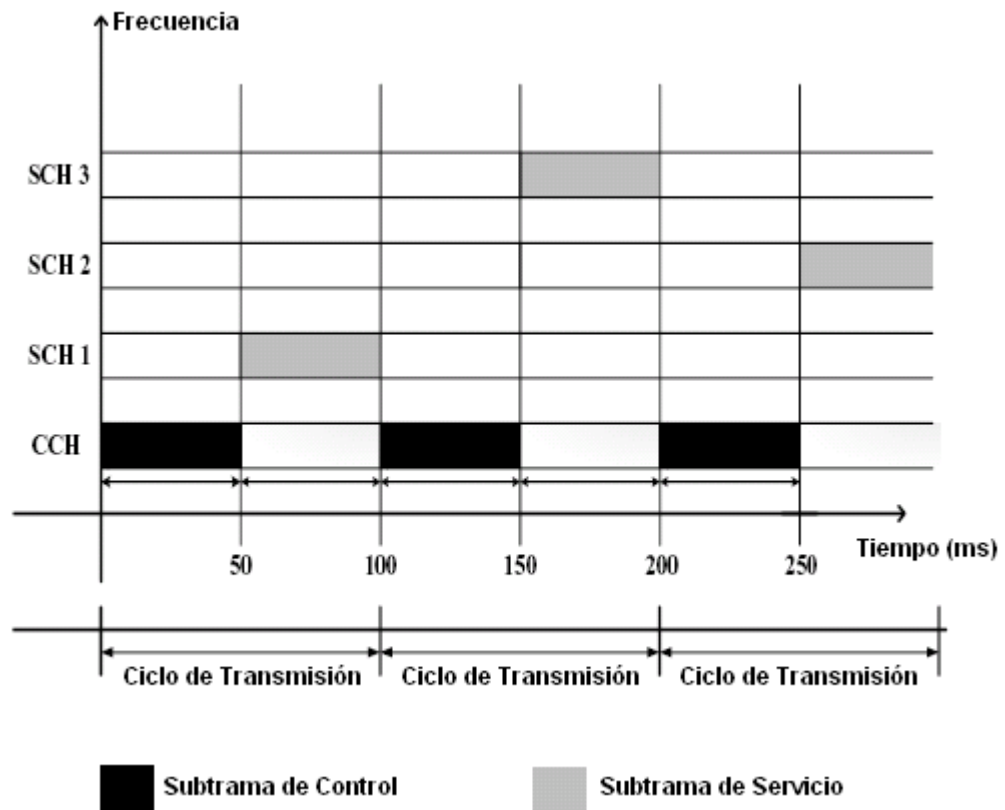


Figura 2-8 Ciclos de Transmisión en 802.11p. [48]

A partir de las diferencias expuestas resalta una que es fundamental entre CCH y SCH, la cual radica en que el primero no usa IP para la transmisión de paquetes. Por lo cual recurre a un protocolo de propósito específico que opera al mismo nivel que IP y que se representa con el acrónimo WSMP (*WAVE Short Message Protocol*) [48]. WSMP toma en consideración las notorias particularidades especiales que define a los entornos de

tránsito vehicular y reduce sustancialmente la carga de los paquetes (disminuyendo las cabeceras) para mejorar el flujo en las transmisiones.

2.4.2.1 Capa MAC en 802.11p

Antes de hablar sobre el funcionamiento de la capa MAC dentro de la norma IEEE 802.11p es conveniente para el lector, conocer de antemano algunos esquemas importantes para la mejor comprensión del contexto en el que se encuentra la norma. Además para entrar a comparar y establecer las diferencias que IEEE 802.11p tiene, respecto del estándar original. Por lo anterior se recomienda leer el Anexo A. para proseguir con la siguiente temática.

La tecnología básica de acceso que utiliza WAVE se denomina IEEE 802.11p y se basa en el acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones, (CSMA/CA) [54]. Este mecanismo se basa también en el modo de priorización de tramas denominado EDCA, inicialmente previsto por el estándar IEEE 802.11e, y se utiliza tanto para el acceso en comunicaciones V2I como para V2V, en esquemas de acceso distribuidos y cliente-servidor. Deriva de la DCF (Función de Coordinación Distribuida), especificada para el estándar original 802.11 [10], pero integra la diferenciación de servicios mediante la definición de cuatro interfaces virtuales de acceso que implementan funcionalidades de *backoff* para el envío de las tramas. Cada interfaz se configura con una serie de parámetros relativos al tamaño máximo de ventana de *backoff*, así como intervalos de espaciado AIFS que son determinados por la clase de acceso que dicha interfaz tenga asignada. Esto permite establecer distintas calidades de servicio para los numerosos tipos de aplicaciones que se prevé servir.

EDCA se basa en el servicio de paquetes de datos según la prioridad asignada a la aplicación que los genera. Para ello, cada estación mantiene configuraciones independientes para cada una de las cuatro categorías de acceso definidas lo cual permite establecer distintas calidades de servicio (QoS) según el tipo de aplicación a la que quiera darse servicio. Cada categoría opera con mecanismos de acceso según escucha de portadora, es decir, cada estación virtual monitorizará el medio durante un intervalo determinado de tiempo o espacio inter-trama arbitrario (AIFS, *Arbitration Interframe Space*) a partir del cual ejecutará un proceso de *backoff* decremental en el que escogerá un número de *slots* aleatorio entre el tamaño máximo de ventana de *backoff* (CW_{max}) y el valor mínimo (CW_{min}), observar en la figura 2-9 [10].

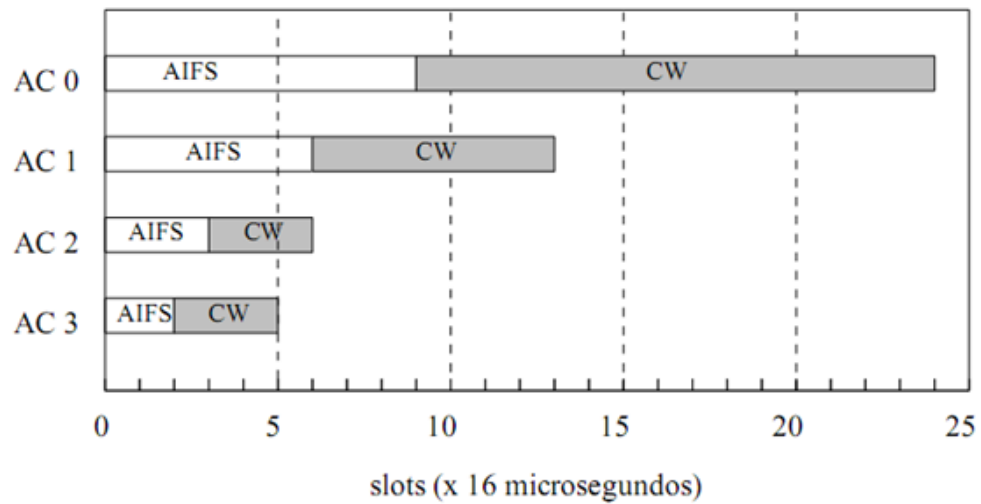


Figura 2-9 Configuración de Parámetros de backoff de IEEE 802.11p [10]

En caso de identificarse una colisión entre paquetes en el momento de transmitir, se producirá una nueva fase de *backoff* en la que los parámetros de tamaño máximo y mínimo de ventana serán modificados para reducir la probabilidad de colisión en los intentos de acceso sucesivos, esta modificación consiste en que cada vez que un intento de transmisión falla, el tamaño de la CW se duplica hasta alcanzar el tamaño indicado por el parámetro CWmax. Si se alcanza el número máximo de intentos posibles, se descarta el paquete y se reinician los valores de CW a los iniciales para el nuevo paquete que se desee enviar al medio.

En la figura anterior se define el slot de 16 μ s pero se podrían usar slots de 8 μ s. A modo de ejemplo, se podría establecer una configuración dinámica de los parámetros en función de la información provista por las capas de aplicación y del entorno de operación, para dar mayor prioridad a una clase respecto a otra bajo circunstancias especiales de comunicación (si requiere tiempo real, si es orientada a conexión, etc.).

En la actualidad el estándar IEEE 802.11p recomienda valores predeterminados para estos parámetros, como los de la tabla 2-2 [17] de configuración, donde 3 representa el más alto nivel de prioridad y 0 el más bajo, aunque en el documento oficial se sugiere modificar sus valores (aCW min y aCW max) para adaptar el funcionamiento al entorno de operación en concreto como se puede ver en las tablas 2-3 y 2-4 [26] para el canal de control y los canales de servicio.

Tabla 2-2 Parámetros de configuración por defecto en IEEE 802.11p

Nivel de QoS	CW min	CW max	AISF
0	15	1023	9
1	7	15	6
2	3	7	3
3	3	7	2

Tabla 2-3 Parámetros de configuración por defecto para el CCH

Nivel de QoS	AC	CW min	CW max	AISF
3	Voz	$(aCW_{min}+1)/4 - 1$	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	2
2	Video	$(aCW_{min}+1)/4 - 1$	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	3
1	Best Effort	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	aCW min	6
0	Background	aCW min	aCW max	9

Tabla 2-4 Parámetros de configuración por defecto para el SCH en IEEE 802.11p

Nivel de QoS	AC	CW min	CW max	AISF
3	Voz	$(aCW_{min}+1)/4 - 1$	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	2
2	Video	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	aCW min	2
1	Best Effort	aCW min	aCW max	3
0	Background	aCW min	aCW max	7

En la capa MAC, WAVE también utiliza el método de acceso de IEEE802.11, basado en CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Para mitigar el problema del terminal oculto, WAVE mantiene el intercambio de mensajes RTS/CTS (*Request-To-Send/Clear-To-Send*), aunque se encuentra deshabilitado en el canal CCH por transmitir siempre en modo *broadcast*. Como consecuencia, todos los nodos que utilizan el canal de control están sujetos a dicho problema, incrementando el riesgo de pérdidas de paquetes y de congestión de canal.

Las redes inalámbricas basadas en 802.11 se componen de zonas determinadas por el alcance de las comunicaciones fijas de un AP (*Acces point*). El AP y todos los nodos móviles (NM, *Mobile Nodes*) asociados a la zona; constituyen un conjunto básico de servicios (BSS, *Basic Service Set*), donde el AP actúa como un puente para las comunicaciones que establecen todos los NMs en el BSS. Entonces cuando un NM deja un BSS para unirse a otro, se establece un proceso denominado *Handover*, el cual se divide en tres fases, ver la figura 2-10. Las fases son:

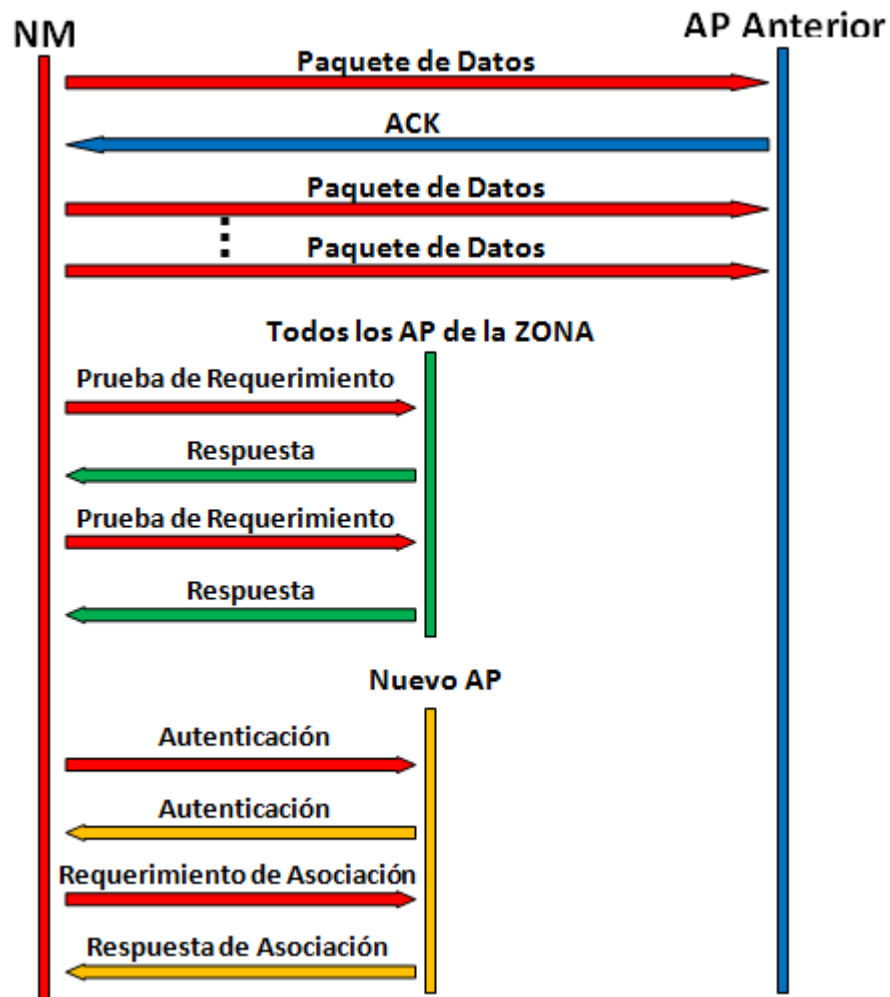


Figura 2-10 Proceso de *Handover* en IEEE 802.11 a/b/g/n. [Por los autores]

- **Fase de Detección:** La necesidad de un *handover* debe ser conocido primero por el NM. Cómo se debe hacer, no se especifica en la norma, pero por lo general, se lleva a cabo un control de la cantidad de paquetes de datos consecutivos no-reconocidos o cuando se detecta que la intensidad de la señal o la relación señal-ruido pasa por debajo de un umbral determinado.
- **Fase de Búsqueda:** En la fase de búsqueda un NM intenta encontrar un nuevo punto de acceso. Esto se puede hacer pasivamente, escuchando el *beacon*⁷ de un AP. Dependiendo del período del *beacon* y del número de canales de frecuencia, que el NM tiene para sintonizar en su búsqueda, esta fase puede tardar hasta 1 segundo. El escaneo activo permite al NM difundir sondeos en cada canal de frecuencia y esperar una respuesta de un AP. Por lo general, esto reduce el tiempo de búsqueda.

⁷ Las tramas *beacon* contienen la información necesaria para identificar las características de la red y poder conectar con el punto de acceso deseado.

- **Fase de Ejecución:** Aquí, se realiza efectivamente a través del intercambio de solicitudes de autenticación, asociación y respuestas del NM y el nuevo punto de acceso.

Estas tres fases definen el proceso de *handover* que se realiza en la capa MAC dentro de una única subred IP. Según [55], en redes más grandes la transferencia se hace entre subredes, por lo tanto los retrasos afectan la capa de red y la dirección que asocia un NM a una subred, por lo que se sugiere modificar éste proceso con el fin de mejorar su desempeño.

La propuesta del estándar IEEE 802.11p se encuentra en la rápida adaptación a los continuos cambios que ocurren en una red de vehículos de gran movilidad, sacrificando procedimientos de identificación y autenticación que suelen ser parte del estándar WLAN 802.11. Para hacer más eficiente el intercambio de datos entre los vehículos de alta velocidad o entre un vehículo y un RSU, IEEE 802.11p especifica un proceso con el ánimo de reducir al mínimo los parámetros para la fase de ejecución del proceso de *Handover*.

En la norma 802.11p, el Conjunto Básico de Servicios WAVE (WBSS, *WAVE Basic Service Set*), se desarrolla en torno a un RSU (o, en la comunicación V2V, alrededor de cualquier vehículo que asuma el papel de un líder WBSS). La existencia de un WBSS se hace a través de un Anuncio de Servicio WAVE (WSA, *WAVE Service Announcement*), a través de un *beacon* enviado desde el líder WBSS (o desde el RSU en el caso de la comunicación V2I). Un vehículo que escucha este *beacon* se configura de acuerdo a la información contenida en la trama del *beacon* y está inmediatamente listo para comunicarse con los RSU de acuerdo a sus instrucciones.

Este proceso se realiza sin autenticación y asociación. Por lo tanto se asegura que el vehículo esté listo para comenzar a comunicarse con los RSU mucho más rápido que en el estándar WLAN original. Por razones de privacidad, un NM hace el cambio de su dirección MAC con regularidad dentro de la red vehicular. Al inicio del sistema, una nueva dirección MAC se determina al azar para que sea más difícil seguir los movimientos de un determinado vehículo.

Como no hay fase de asociación cuando un vehículo entra en el WBSS del RSU, la dirección MAC no se pasa a la RSU, mejorando aún más la intimidad del conductor. Por otro lado, la falta de un proceso de asociación y de autenticación significa que los RSU no tienen los medios para la identificación de un vehículo y tampoco para saber si el vehículo ha dejado la zona de cobertura y ya está fuera de su alcance de transmisión.

Con la intención de aclarar los cambios existentes que hay entre 802.11 y 802.11p es preciso tener en cuenta la norma IEEE 802.11a que es la tecnología de la cual evoluciona IEEE 802.11p, por tanto se hace una comparación de estas dos normas en la tabla 2-5.

Tabla 2-5 Comparación entre 802.11a y 802.11p.

Características	802.11a	802.11p
Velocidad de Tx Mb/s.	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54	3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27
Modulación.	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM.	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM.
Tasa de Codificación.	1/2, 1/3, 3/4	1/2, 1/3, 3/4
Número de Subportadoras.	52 (= 48+4)	52 (= 48+4)
Longitud de Símbolo OFDM.	4 useg.	8 useg.
Tiempo de Guarda.	0.8 useg.	1.6 useg.
Periodo FFT.	3.2 useg.	6.4 useg.
Duración de Preámbulo.	16 useg.	32 useg.
Frecuencia	5 GHz	5.9 GHz
Ancho de Banda Utilizado	300 MHz	70 MHz
Espaciamiento en frecuencia de subportadoras.	0.3125 MHz.	0.15625 MHz.
Fase de Ejecución Capa MAC.	Identificación, Autenticación.	No Identificación, No Autenticación.
Número de Canales	12	7
Ancho de Banda por Canal	20 MHz	10 MHz

En la tabla 2-5 se observa que 802.11p presenta varios cambios en sus características con respecto a 802.11a, así:

- Velocidad de Transmisión: es la mitad, con respecto a 802.11a.
- Modulación: no presenta cambios.
- Tasa de Codificación: no presenta cambios.
- Número de Subportadoras: no presenta cambios.
- Longitud de Símbolo OFDM: se duplica, por lo que la señal es más robusta contra el desvanecimiento.
- Tiempo de Guarda: es el doble, con respecto a 802.11a.
- Periodo FFT: el doble, con respecto a 802.11a.

- Duración de Preámbulo: el doble, con respeto a 802.11a.
- Frecuencia: La norma 802.11p generalmente opera en los 5,8 GHz y 5,9 GHz, dependiendo de las regulaciones regionales y las autoridades reguladoras, y la banda puede ser de 700 MHz o 900 MHz, esta banda aún está en la discusión.
- Ancho de Banda Utilizado: inferior, con respeto a 802.11a.
- Espaciamiento en Frecuencia de Subportadoras: es la mitad, con respeto a 802.11a.
- Fase de Ejecución Capa MAC: el cambio existe por cuanto en 802.11p no hay identificación y autenticación.
- Número de Canales: inferior, con respeto a 802.11a.
- Ancho de Banda por Canal: En 802.11p, el ancho de banda de 10 MHz se utiliza generalmente, con el fin de hacer la señal más fuerte contra el desvanecimiento, pero en la práctica el ancho de banda de 20 MHz es opcional.

Este capítulo destaca la enmienda 802.11p como una de las alternativas para brindar mejoras a los avances que se realiza en las ITS, por otra parte se han identificado y analizado los aspectos técnicos de la enmienda a nivel MAC y físico y se han determinado las diferencias que existen con el estándar original, también se desarrolla la introducción que hace el primer capítulo refiriéndose a las redes inalámbricas y al aspecto móvil que existe en los entornos vehiculares, se ha hecho una reseña de los problemas del entorno y se han determinado los parámetros que impactan el desempeño en la prestación de servicios de Datos, Voz y Video IP como es el caso de las categorías de acceso según el tipo de tráfico a transmitir en una red bajo la enmienda 802.11p. Con ello se cumple con el primer objetivo y parte del segundo.

Al abordar los siguientes capítulos es indispensable tener en cuenta las especificaciones de la enmienda y en gran medida las mejoras y cambios que 802.11p tiene con respecto al estándar original.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En los capítulos anteriores se ha hecho una descripción de los conceptos más relevantes de las redes inalámbricas, redes Ad Hoc, sus características, evolución hacia entornos vehiculares y los principales avances logrados a nivel investigativo en los diferentes países en donde se está estudiando dicho tema. En el presente capítulo se hace una descripción del proyecto y del proceso que se ha seguido en el transcurso de esta investigación, así como el aporte para la estimulación de la continuidad del estudio de este tipo de redes y su aplicabilidad en el ambiente colombiano.

A lo largo de este capítulo se describe el proyecto, sus aplicaciones y el proceso que se llevó a cabo para discernir los escenarios a simular; de igual forma se especifican y describen las características que tiene la herramienta de simulación, ventajas y desventajas; posteriormente se detallan las diferentes pruebas y escenarios a simular justificando su importancia y resultados esperados.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

El automóvil es uno de los medios de transporte que goza de mayor popularidad, su uso se ha convertido en una necesidad para muchas personas. Con el objetivo de brindar mayor comodidad y una mayor cantidad de servicios a los usuarios, se han integrado algunas tecnologías como por ejemplo: GPS, sistemas de audio y video. Actualmente para lograr intercambios de flujos de información es necesario contar con una infraestructura que los posibilite y los dinamice teniendo en cuenta criterios de oportunidad, seguridad y confiabilidad.

Este trabajo se enmarca en una tecnología hasta ahora poco implementada en Colombia como son las ITS en redes vehiculares aunque, existen algunas investigaciones a nivel mundial, en el país apenas está siendo desarrollada; en la actualidad se convierte en un campo de investigación abierto en donde todos los resultados experimentales y teóricos influyen en el desarrollo, implementación, divulgación y posterior comercialización de esta nueva tecnología. Por esta razón, y por tratarse de un área que se puede proyectar para un futuro muy próximo, los autores han considerado iniciar su estudio en el ámbito local [56].

Para este fin, se planteó un estudio del estado del arte de las redes inalámbricas, redes vehiculares (VANETS) y de esta manera identificar sus características, protocolos y aplicaciones para consolidar el conocimiento en el tema. Posteriormente, se formularon escenarios de redes vehiculares para ser simulados en la herramienta NCTUns 6.0, resultantes del estudio teórico y de las posibilidades de simulación que permitió la herramienta.

La herramienta NCTUns, en sus últimas versiones, introduce el concepto de redes vehiculares permitiendo desarrollar trabajos de simulación facilitando el perfeccionamiento y construcción de modelos que reflejen, lo más fielmente posible, el comportamiento de este nuevo tipo de redes.

En el transcurso de este trabajo se definieron los ambientes tanto de movilidad como de ubicación de los nodos y las métricas con las que serán evaluados los resultados de dicha simulación acerca del comportamiento de estas redes vehiculares.

3.2 MOTIVACIÓN Y APLICACIÓN

A nivel mundial se ha ido observando el incremento acelerado del parque automotor sin que la infraestructura vial pueda tener un desarrollo paralelo. Esto trae consecuencias negativas respecto de la movilidad y la seguridad en las vías. Por esta razón y también por la progresiva disminución de recursos naturales como el petróleo, se ve la necesidad de optimizar el uso del automóvil. Para esto, surge el concepto de redes vehiculares el cual está siendo investigado para lograr mejorar la movilidad, la seguridad, la comodidad y ampliar el uso de las comunicaciones [5].

En Colombia, está más acentuada la diferencia entre el desarrollo de la infraestructura vial y el crecimiento vehicular, lo cual se ve reflejado en el alto número de accidentes automovilísticos, congestión vial, alto costo en los fletes del transporte de carga afectando la competitividad del país a nivel mundial; en los entornos urbanos, el número de vehículos va en aumento, lo que incrementa el caos vehicular, embotellamientos y accidentes por lo cual se hace necesario el estudio de la aplicabilidad de este tipo de soluciones [57].

El país, además de los problemas mencionados anteriormente tiene el problema de seguridad nacional causado por los grupos al margen de la ley. Uno de los beneficios que puede tener la aplicabilidad de este tipo de soluciones es el aumento de las comunicaciones para aviso y atención de cualquier tipo de evento de inseguridad; así mismo, debido a la geografía accidentada, las vías son propensas a derrumbes, deslizamientos, inundaciones, embotellamientos y otros tipos de problemas los cuales pueden ser oportunamente informados a los conductores implementando servicios de alerta y ayuda en la vía, a través de éstas redes vehiculares.

También es conveniente resaltar que este tipo de tecnología permite la posibilidad de mejorar la comodidad de los desplazamientos y generar oportunidades de negocio.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Para iniciar el estudio de la aplicabilidad de las redes vehiculares en Colombia se describió el concepto de redes vehiculares y su estado del arte a nivel mundial con el objetivo de conocer los últimos avances y dar una visión general de estado de la investigación que actualmente se tiene en este tema. Uno de los principales aspectos de este tema de investigación es conocer los protocolos y estándares de la capa física del Modelo de Referencia OSI que rigen este tipo de redes entre los cuales se encuentran como principales los estándares IEEE 802.11b e IEEE 802.11p.

Conociendo las principales características y limitaciones de este nuevo tipo de redes y la herramienta de simulación, se hizo una evaluación de los escenarios representativos del país a nivel urbano para la definición del ambiente de simulación. Se determinó la simulación en ambiente urbano porque aquí es donde se vislumbran los principales problemas de movilidad y accidentalidad expuestos anteriormente [57]. Dentro de este marco se realiza el diseño del tamaño de la cuadrícula de simulación o malla vial teniendo en cuenta la simetría de los entornos urbanos de las diferentes ciudades del país y teniendo en cuenta también las normas nacionales que regulan las dimensiones de las vías.

Para realizar la simulación de los escenarios seleccionados y determinar sus alcances, fue necesario conocer la herramienta de simulación; para este proyecto se seleccionó el simulador NCTUns debido a que es una herramienta que lleva incluido en su versión 6.0 el módulo de redes vehiculares. En esta herramienta se encuentran integrados simuladores de tráfico y movilidad, lo que permite una simulación más real, integral y confiable.

Anteriormente se han mencionado algunas de las ventajas que tiene la herramienta en el proceso de simulación y emulación de redes. A continuación se presenta la tabla 3-1 con ventajas y desventajas de la misma.

Tabla 3-1 Ventajas y desventajas de NCTUns.

Ventajas	Desventajas
Software libre. Distribución de código abierto lo cual permite que los usuarios realicen mejoras y correcciones al software.	Funciona sin inconveniente sobre Linux Fedora y Red Hat, en los demás se requiere cambios en la configuración.
Utiliza el conjunto de protocolos TCP/IP de Linux, por lo que se generan resultados de alta fidelidad. Permite que la configuración de una red simulada sea similar a las redes IP reales.	No hay mucha información sobre funcionamiento y configuración del software.
Puede ser usado como emulador, permitiendo que un host conectado a una red real pueda intercambiar paquetes de datos con nodos de una red simulada.	Debido a que no tiene suficiente soporte el tiempo para el conocimiento de la herramienta es mayor.
Puede simular gran cantidad de dispositivos de red como por ejemplo: <i>hub</i> , <i>switches</i> , <i>routers</i> , estaciones móviles, OBU, RSU, etc., y obstáculos para las señales inalámbricas.	
Simula varios protocolos de redes como: IEEE 802.3, IEEE802.11, IP, IP Mobile, RIP, TCP, UDP, FTP, OSPF, RTP/RTCP, etc.	

En el proceso de conocimiento de la herramienta se incluyó la investigación de todos los posibles parámetros que se deben configurar a cada uno de los nodos para de esta forma

obtener resultados acordes a la realidad. Estos parámetros se encuentran ubicados dentro de cada una de las capas de los protocolos que actualmente se están utilizando para las investigaciones y simulaciones de las redes vehiculares. Adicionalmente se deben tener en cuenta aspectos de propagación de las señales de radio ya que este tipo de redes también usan la interfaz de aire como medio de transmisión, aspectos importantes como los obstáculos y por supuesto las características de la infraestructura vial.

Una vez identificados estos aspectos se procedió a la configuración de los diferentes escenarios en la herramienta. Para lograr resultados satisfactorios fue necesario realizar múltiples simulaciones evaluando diferentes condiciones de tal manera que cada simulación se acerque más a la realidad. Debido a que la herramienta proporciona estadísticas de las diferentes mediciones como por ejemplo: *throughput*, pérdida de paquetes es posible determinar qué tan viable es la implementación de este tipo de redes en Colombia.

En el transcurso de las simulaciones y en los diferentes escenarios se analizó el desempeño de dos protocolos como son el TCP y el UDP, ya que bajo éstos corren la mayoría de las aplicaciones en los entornos reales.

Con el desarrollo de este trabajo se buscó además de evaluar el comportamiento de este tipo de redes y de verificar que sean o no aplicables al entorno colombiano para la prestación de servicio de Datos, Voz y Video IP, dar a conocer un nuevo esquema de comunicaciones que puede ayudar a resolver problemas de diferente índole y también abrir oportunidades de investigación y de nuevos negocios dentro del país.

3.4 ESPECIFICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Para identificar y construir los diferentes escenarios de simulación se tuvieron en cuenta los estándares que actualmente se aplican a las redes vehiculares como es la enmienda IEEE 802.11p y los diversos servicios que se pueden prestar a través de ella.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, en este ítem se describen los diferentes escenarios para realizar el presente trabajo, éstos escenarios se diseñan dentro de un ambiente netamente urbano con alta densidad vehicular debido a que en las ciudades es donde se vislumbra principalmente el problema de movilidad. En cada uno de los escenarios se procede a evaluar el comportamiento de conexiones TCP, transmisión de Datos, y UDP, para la transmisión de Voz y Video, que son los protocolos de comunicación más usados por los servicios reales.

El proceso de simulación y descripción de escenarios se basa en buscar las características de funcionamiento del estándar 802.11p, analizando cómo se afecta la comunicación entre vehículos debido a parámetros como la velocidad de los móviles, distancia de cobertura, número de vehículos en la red, tipo de servicio (Datos, Voz y/o Video IP), etc.

Dado que la finalidad de las redes vehiculares y en especial de la enmienda 802.11p es dar soporte a servicios de emergencia en tiempo real, se hace necesario implementar ésta característica en los diferentes escenarios.

Las pruebas a realizar se hacen sobre entornos idealizados, es decir, sin tener en cuenta aspectos como: obstáculos, pérdidas de propagación, interferencias, cambios de celda, etc. Se hacen las pruebas de esta forma ya que se está iniciando el análisis y exploración de este tipo de redes vehiculares, y la viabilidad de los servicios de Datos, Voz y video IP, en las mismas; por lo tanto se generalizan los escenarios y se plantea para futuros estudios la inclusión de características más específicas.

En cuanto al tráfico modelado, es tráfico de tasa de bit constante (CBR, *Constant Bit Rate*) y el tamaño de paquete de acuerdo al escenario a simular, de igual forma que su frecuencia de transmisión.

Considerando los rangos típicos de transmisión de los AP y la situación legal en cuanto a la emisión de energía electromagnética en entorno urbanos mediante tecnologías Wi-Fi en territorio colombiano [58] se trabajará con 1 W como máxima potencia de transmisión.

Según lo descrito anteriormente, WAVE trabaja con IPv6, sin embargo, IPv6 no implementa *broadcast*, [59] que es la habilidad de enviar un paquete a todos los nodos del enlace conectado, por lo tanto en las pruebas de Datos, voz y video se manejan enlaces Punto a punto (*Unicast*) y punto multipunto (*Multicast*).

La duración de las simulaciones es de 90 Sg, ya que después de este tiempo la herramienta de simulación empieza a arrojar datos estadísticos promedio, y se consideró suficiente esta ventana de tiempo para el análisis de los parámetros requeridos.

Dentro de este escenario urbano se plantean las siguientes pruebas con sus respectivos sub escenarios.

- Transmisión de Datos, Voz y Video IP Ad Hoc pura entre vehículos utilizando estándar 802.11p.
- Análisis de los parámetros de velocidad y cobertura en 802.11p.
 - Sub escenario 1: influencia de la velocidad
 - Sub escenario 2: rango de cobertura
- Escenario Urbano, Prueba 1: Transmisión de datos pura entre vehículo e infraestructura
 - Sub escenario 1: enlace punto a punto
 - Sub escenario 2: enlace punto multipunto (múltiples móviles)
- Escenario Urbano, Prueba 2: Transmisión de Voz pura entre vehículo e infraestructura
 - Sub escenario 1: transmisión punto a punto con códec G711
 - Sub escenario 2: transmisión punto multipunto con códec G711
 - Sub escenario 3: transmisión punto a punto con códec G729
 - Sub Escenario 4: transmisión punto multipunto con códec G729

- Escenario Urbano, Prueba 2: Transmisión de Video pura entre vehículo e infraestructura
 - Sub escenario 1: transmisión punto a punto
 - Sub escenario 2: transmisión punto multipunto
- Escenario Urbano, Prueba 4: transmisión de videoconferencia (Voz, Video IP y Datos), entre vehículo e infraestructura
 - Sub escenario 1: sin calidad del servicio
 - Sub escenario 2: con calidad del servicio
- Análisis y comparación en el desempeño cuando existe cambio de celda (*handover*) entre 802.11b y 802.11p.

3.4.1 Transmisión de Datos, Voz y Video Ad Hoc pura entre vehículos utilizando estándar 802.11p

Este escenario describe la comunicación Ad Hoc entre vehículos bajo el estándar IEEE 802.11p en donde se pueden verificar las condiciones de transmisión de datos y la capacidad para los servicios que utilicen los protocolos TCP y UDP bajo las especificaciones de este estándar. La transmisión de datos será óptima cuando se encuentren en proximidad o en línea de vista mientras que cuando la distancia de separación sea mayor al radio de cobertura de dichos nodos, la comunicación será menos eficiente reflejada en un menor *throughput*.

La finalidad de simular este entorno es validar la implementación de servicios de Voz y Video IP, en ausencia de RSU entre múltiples OBUs y evaluar el impacto que tiene sobre el desempeño de la transferencia de información cuando varios vehículos transmiten simultáneamente, figura 3-1.

Para el desarrollo de este escenario se presenta un inconveniente referente al protocolo de enrutamiento necesario para buscar los destinatarios y las rutas que debe seguir la información; como se explicó en el capítulo 2.

Los protocolos de enrutamiento más utilizados para la configuración de redes Ad Hoc en entornos vehiculares (Vanets) son el OSLR y AODV, pero el uso de estos protocolos proactivos y reactivos, en su rendimiento en entornos urbanos y autopistas, para condiciones *unicast* ideales, introducen un retardo entre 100ms y 200ms por salto para TCP y un retardo de 100ms y 250ms para UDP (Voz y Video) [60]. Además el porcentaje de éxito en los paquetes es del 50% para entornos móviles continuamente cambiantes como son los vehiculares.

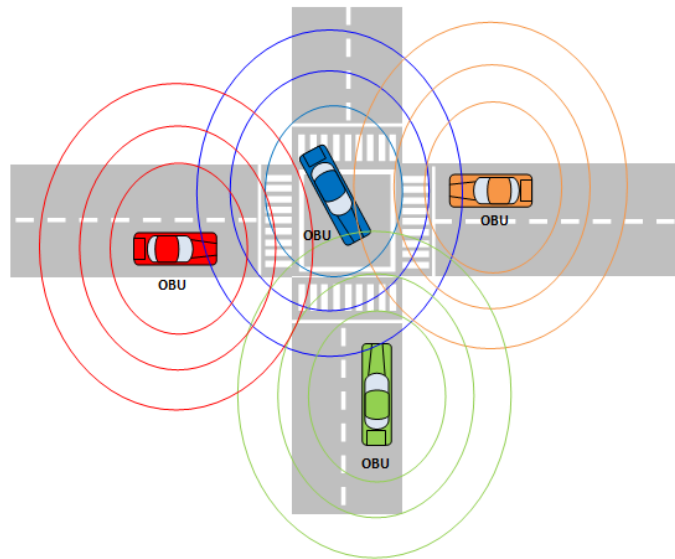


Figura 3-1 Comunicación Ad Hoc pura entre vehículos 802.11p. [Por los autores]

Según [61], el uso de CSMA presenta una pérdida de paquetes de hasta un 80% en escenarios de hasta 1000 mts de cobertura y de 22% en escenarios de hasta 500 mts, debido a las colisiones que se presentan en el ambiente, un OBU puede permanecer invisible al emisor hasta 10 sg.

Debido al retardo introducido y la pérdida de paquetes explicada anteriormente, la implementación de servicio de voz y video en tiempo real, no es viable en condiciones de calidad aceptables ya que se sobrepasan los umbrales de tiempo y pérdida de paquetes especificados en la recomendación ITU-T G.1010 para la implementación de servicio en tiempo real [62], que especifica un retardo máximo de 150 ms de extremo a extremo y una pérdida de paquetes inferior al 3%.

Teniendo en cuenta la potencia recomendada para el OBU, en la tecnología DSRC con soporte en 802.11p según [63], los valores de dicha potencia varían entre 1 mW y 100 mW, en consecuencia el área de cobertura máxima sería aproximadamente de 100 Mts. cumpliendo los requisitos, según [64], para Aplicaciones Cooperativas para Prevención de Choques (CCWA, *Cooperative Collision Warning Applications*) definidas como servicios en ITS, el OBU tiene una potencia de 250 mW con un radio aproximado de cobertura de 150 mts [65].

Por lo descrito anteriormente se puede deducir que la prestación de servicios como video conferencia o llamadas en tiempo real a través de una configuración Ad Hoc en redes vehiculares son poco viables ya que el área de cobertura es muy pequeña, lo cual no es útil debido a que la comunicación se establece a muy corta distancia para cumplir con mejores características de calidad.

3.4.2 Análisis de los parámetros de velocidad y cobertura en 802.11p.

Uno de los factores que puede afectar el desempeño de la comunicación inalámbrica en entornos vehiculares y que lo diferencia respecto al estándar original es la parte de la movilidad de los usuarios y la velocidad a la que se desplazan; en Colombia, para entornos urbanos la máxima velocidad permitida para vehículos es de 60Km/h y en carretera de 80Km/h [66] este escenario busca identificar a qué velocidad máxima la comunicación aún es posible y si éste parámetro es determinante para el desempeño de la red vehicular.

Así mismo, el rango de cobertura determina la distancia en que los OBU pueden recibir y enviar información al RSU de manera satisfactoria, según la enmienda 802.11p la meta es lograr una cobertura de 1000 mts sin necesidad de repetidores entre dos estaciones o entre una RSU y una OBU, este Sub-escenario busca la máxima distancia posible para que la transmisión sea viable.

3.4.2.1 Sub escenario 1: Influencia de la velocidad

Esta comunicación se hace en un escenario idealizado en forma de óvalo, ya que permite que el móvil alcance la máxima velocidad de movimiento sin obstáculos, la velocidad del móvil se varía de 20 Km/h hasta 240 Km/h en intervalos de 20 Km/h, la comunicación se hace en forma directa entre un RSU y un OBU enviando paquetes UDP punto a punto a través de direccionamiento IP, se utilizan antenas omnidireccionales, el escenario se observa en la figura 3.2.

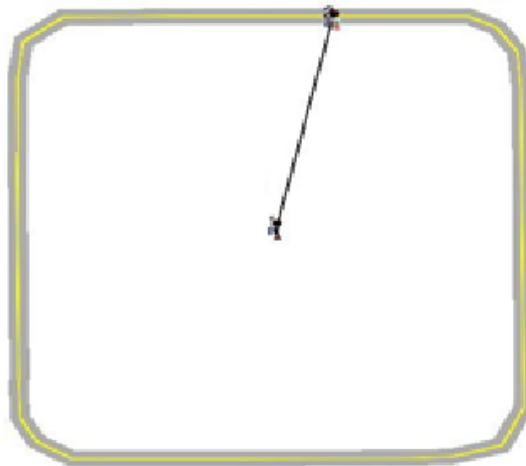


Figura 3-2 Sub Escenario 1: Influencia de la Velocidad.

En este sub-escenario se escogió un paquete de tamaño de 1450 bytes (MTU < 1500 bytes) cada 10 ms, esto para simular la más alta condición de sobrecarga que se puede establecer en UDP bajo las condiciones del NCTUns, además de que el simulador solo permite medir pérdida de paquetes y retardo bajo el uso de UDP, y no TCP.

3.4.2.2 Sub-Escenario 2: Rango de cobertura

Para este escenario se utiliza una grilla similar a la descrita anteriormente, el móvil se desplaza a una velocidad constante de 40Km/h, se escogió un paquete de tamaño de 1450 bytes (MTU < 1500 bytes) cada 10 ms, por las razones anteriormente expuestas, se varió la distancia de cobertura desde 100 mts hasta 800 mts en rangos de 50 mts, además la potencia de transmisión escogida fue de 1watt, el escenario se observa en la Figura 3.3.

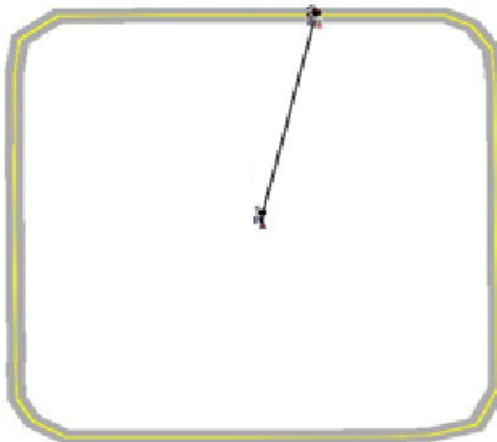


Figura 3-3 Sub Escenario 2: Rango de Cobertura

3.4.3 Análisis en Escenario Urbano, Prueba 1: Transmisión de datos pura entre Vehículo e Infraestructura

En este escenario se evalúa el comportamiento de las redes inalámbricas vehiculares para la transmisión de datos, la comunicación se establece de dos formas, entre la RSU y un único OBU, como se ve en la figura 3.4, y entre un RSU y varios OBUs, como se ve en la figura 3.5, con el fin de establecer las condiciones en ausencia de tráfico y determinar el máximo número de OBUs que un RSU puede mantener en servicio, bajo condiciones de calidad aceptables según la recomendación de la ITU-T G.1010.

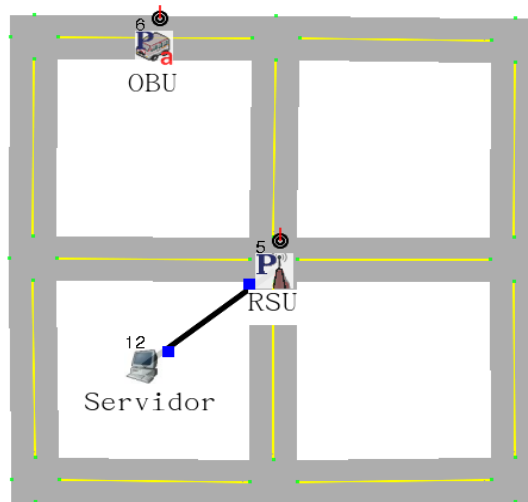


Figura 3-4 Enlace Punto a Punto

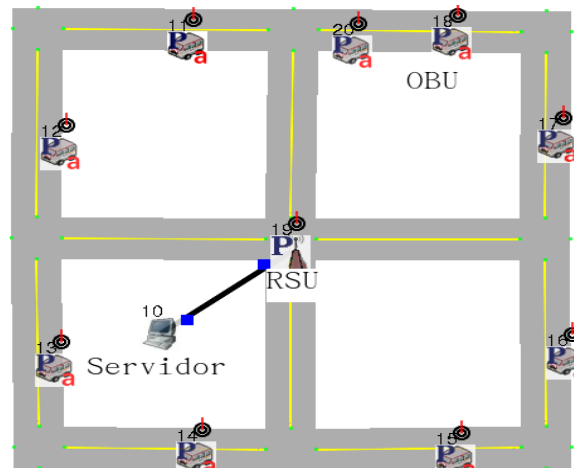


Figura 3-5 Enlace Punto Multipunto

La cuadrícula de simulación o grilla propuesta consta de 1 manzana de dimensiones 200 x 200 mts en donde las vías están formadas de dos carriles uno en cada sentido. Para la elaboración de esta cuadrícula se toman como referencia la parte céntrica de ciudades con alta simetría en su estructura vial los cuales se pueden apreciar en ciudades como Popayán, Palmira, Cali, Medellín, entre otros, como se aprecia en la figura 3.6.



Figura 3-6 Simetría vial de una ciudad Colombiana (Referencia Popayán) [67]

Las dimensiones de las vías y las bermas para la configuración del esquema de simulación en la herramienta, son tomadas del manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles desarrollado por Guido Radelat Egües de la Universidad del Cauca [67], en donde se establece un ancho de carril de 3,60 mts y una berma de 0.8 mts., para un ancho total de vía de aproximadamente 9 mts.

3.4.4 Análisis en Escenario Urbano, Prueba 2: Transmisión de Voz pura entre vehículo e infraestructura

En este escenario se configura la simulación para prestar servicios de voz (tráfico UDP), los servicios de voz cubren una amplia gama de aplicaciones, por lo tanto se hace necesario caracterizar el tipo de servicio que pueda utilizar la red y cuál es más viable para redes inalámbricas en entornos urbanos.

Teniendo en cuenta lo anterior se escogieron dos códecs de voz, el G711 [68] y el G729. Estos códecs permiten codificar la voz para que sea posible su transmisión a través de la red, así mismo comprimen y descomprimen la información de tal forma que el ancho de banda a utilizar sea menor.

Inicialmente, se simula la red para una configuración punto a punto y posteriormente se va incrementando el número de vehículos pasando a una configuración punto multipunto para cada uno de los códecs, esta prueba permite ver la variación del *throughput* y pérdidas a medida que el número de móviles aumenta.

La configuración de la grilla de simulación es similar a la de la figura 3-4 y la figura 3-5 presentada anteriormente.

3.4.5 Análisis en Escenario Urbano, Prueba 3: Transmisión de Video pura entre vehículo e infraestructura

En este escenario se configura el simulador para prestar servicios de video IP, se escogió el códec de video MPG-4 versión 10 o H.264/AVC, ya que es el más utilizado en el mercado y presenta mejores características de compresión y transmisión de datos.

En la simulación se presentan dos sub-escenarios de transmisión de Video IP, el primero usando un enlace punto a punto entre la infraestructura (RSU) y un solo vehículo (OBU) bajo el protocolo UDP y utilizando el Códec H.264/AVC, bajo la configuración anteriormente expuesta, ver figura 3-4; el segundo usando un enlace punto multipunto entre un RSU y varios OBU bajo el protocolo UDP y utilizando el Códec H.264/AVC y se hace el análisis de cómo se afecta el Throughput, la Pérdida de Paquetes y el Retardo en un OBU, cuando se incrementa el número de OBUs.

3.4.6 Análisis en Escenario Urbano, Prueba 4: Transmisión de videoconferencia (Voz, Video IP y Datos), entre vehículo e infraestructura

Para brindar un buen servicio y desempeño por celda en distintos enlaces de comunicaciones bajo la norma 802.11p, se debe determinar la cantidad de sesiones de Voz, Video IP y Datos que pueden coexistir en un momento dado prestando un servicio de calidad aceptable, por lo cual se hará uso del mecanismo EDCA que la norma 802.11p posee como apoyo en la diferenciación de servicios y aplicación de QoS,

Por lo tanto se tomará un número de sesiones de Video Conferencia (Video y Voz) igual al número soportado en el análisis de Video IP ya que este muestra la carga de tráfico más cercana en similitud de ancho de banda, y se carga un tráfico adicional de Datos en TCP para intentar saturar la red y comparar el desempeño de los servicios en la red, sin QoS (sub_escenario 1) y utilizando QoS (sub_escenario 2); bajo las características que por defecto se configuran para 802.11p, validando lo anterior dentro de las simulaciones de cada escenario específico.

3.4.7 Análisis y comparación en el desempeño cuando existe cambio de celda (*handover*) entre 802.11b y 802.11p.

Se denomina *Handover* (también *Handoff*) al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura [69].

En este escenario se analiza el tiempo que le lleva a un OBU conectar y desconectarse de un RSU cuando sale o entra a un área de cobertura nueva. En este caso no se

configura ningún protocolo de enrutamiento puesto que la herramienta de simulación no permite su configuración bajo el estándar 802.11p y por tanto se compara bajo iguales condiciones en las dos enmiendas.

El escenario es similar al mostrado en la figura 3.7.

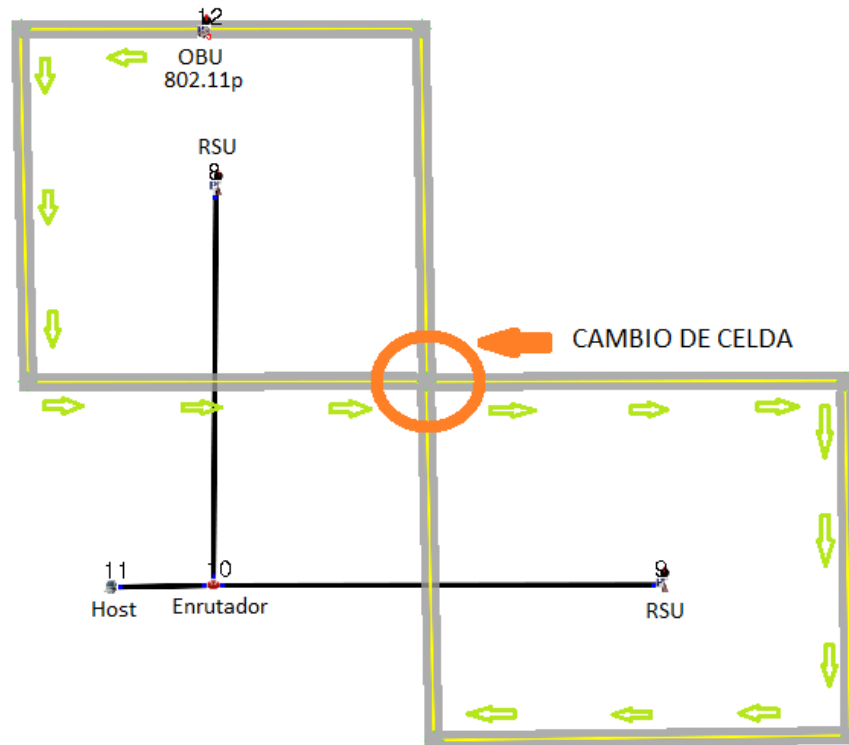


Figura 3-7 Configuración de Grilla para *Handover*

3.5 INDICADORES DE RENDIMIENTO DE RED

Los indicadores son las métricas que permiten evaluar el desempeño de los protocolos en cada uno de los escenarios planteados.

Se van a evaluar los siguientes indicadores ya que son los más importantes para permitir el entendimiento y la evaluación del desempeño de una arquitectura de red.

- **Throughput [70]**

El *throughput* es el mejor parámetro que caracteriza el rendimiento que se alcanza en cada una de las simulaciones y está definido como el cociente entre la cantidad de información útil recibida y la duración total de la comunicación, es una medida promedio de la cantidad de datos transmitidos que contienen información útil y no redundante por segundo.

- **Pérdida de paquetes**

La pérdida de paquetes es considerado como el número de paquetes de datos que se pierden o que son rechazados durante el transcurso de la comunicación.

- **Retardo**

El retardo es el tiempo que le lleva a un paquete de datos llegar a su destino; esta medida para efectos de la simulación es un promedio de todos los paquetes transmitidos.

4. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y evalúan los resultados obtenidos en el proceso de simulación de los diferentes escenarios planteados en el capítulo anterior. En todos los casos se presentan las métricas indicadas para evaluar el desempeño de la red, en la transmisión de Voz y Video IP en tiempo real y Datos; el *Throughput*, el Retardo y las Pérdidas de paquetes se miden y analizan para determinar cuándo un servicio se presta en condiciones aceptables, ya que se varía el número de OBUs por celda, la velocidad del OBU y la distancia de cobertura, además se muestra a manera de información la incidencia de la utilización de QoS y se compara el proceso de handover entre las enmiendas 802.11b y 802.11p. Todos los datos aquí recopilados se toman del lado del receptor y según el proceso que se explica en el anexo B.

Las gráficas mostradas en el presente capítulo se obtienen de la toma de resultados suministrados de los archivos generados por el simulador NCTUns 6.0, y de su preliminar configuración para cada escenario, como explica en el Anexo B. Para cada variación de los parámetros del eje x de cada grafica se efectúa una simulación de 90 seg. y posteriormente se calcula el promedio de las mediciones para plasmar los datos en la gráfica.

4.1 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE VELOCIDAD Y COBERTURA EN 802.11P.

En esta primera simulación se evalúa la influencia de algunos parámetros como la velocidad del vehículo y la cobertura (distancia de separación entre el receptor y el emisor), sobre las variables *throughput*, retardo y pérdida de paquetes al variar la velocidad y el radio de cobertura del vehículos, utilizando la enmienda 802.11p. En el sub-escenario 1 se evaluará el impacto del aumento de la velocidad en las variables *throughput*, retardo y pérdida de paquetes en una transmisión *unicast* en un escenario V2I, de igual manera en el sub-escenario 2 se evaluará el impacto al variar el radio de cobertura sobre las variables *throughput*, retardo y pérdida de paquetes en una transmisión *unicast* en un escenario V2I.

4.1.1 Sub-escenario 1: Influencia de la velocidad

Se puede apreciar en las figuras 4-2 y 4-3 que el parámetro velocidad no denota cambios sustanciales que puedan influir en el desempeño de la red a la hora de transmitir cualquier tipo de servicio. En la figura 4-2, *Throughput Vs Velocidad*, el *throughput* se mantiene relativamente constante en el orden de 1.132.812 bps, la pérdida de paquetes es aproximadamente nula 0% y el retardo promedio en la figura 4-3 se mantiene en 16,7 ms.

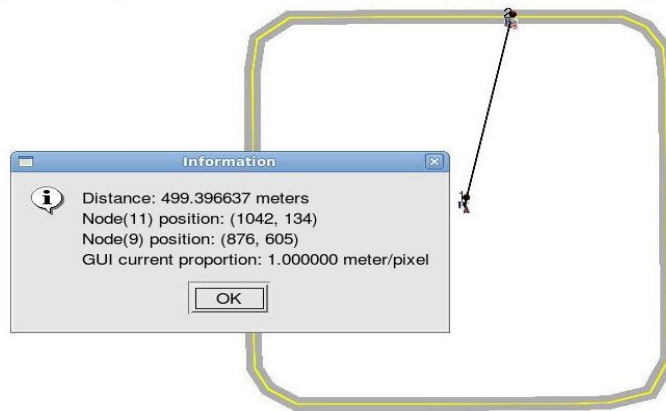


Figura 4-1 Efectos de la Velocidad en 802.11p.

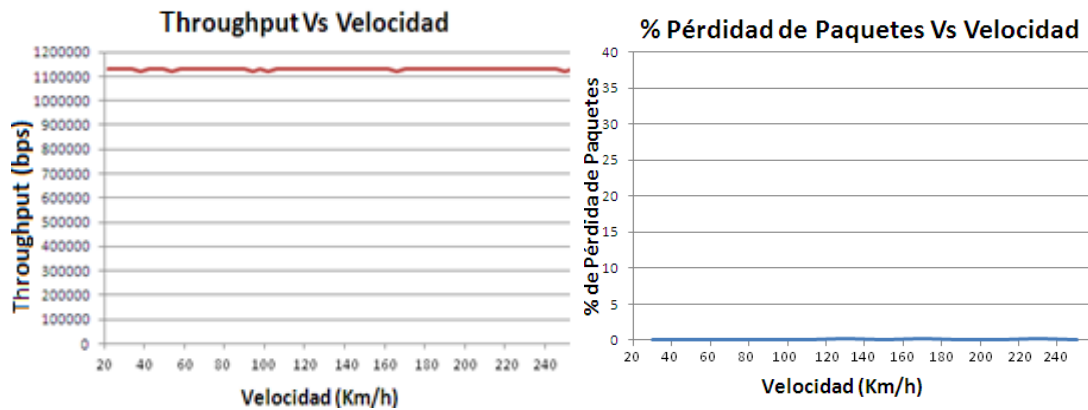


Figura 4-2 Throughput Vs Velocidad y % de Pérdida de Paquetes Vs Velocidad en 802.11p.

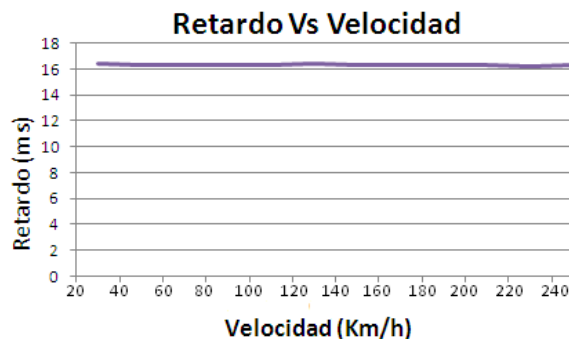


Figura 4-3 Retardo Vs Velocidad en 802.11p.

Según el análisis anterior la velocidad no incide en el desempeño de la red, pero si aumenta considerablemente los cambios de topología [11] e incrementa la frecuencia de aparición de los fenómenos de terminal escondido y terminal expuesto (véase anexo A) que afectan el desempeño de la red y también eleva los riesgos de pérdida de señal en

intervalos muy cortos de tiempo debidos a: cambios de celda, obstáculos, interferencia y cobertura [11].

De aquí que la Velocidad juega un papel importante en el comportamiento de la red ya que incide indirectamente al aumentar los riesgos de pérdida de señal continuamente y en intervalos muy cortos de tiempo.

4.1.2 Sub-escenario 2: Rango de Cobertura

A pesar de que la tecnología IEEE 802.11p cuenta con altas velocidades de transmisión de datos presenta una desventaja relacionada con su limitado rango de cobertura. Para sobrellevar esto, el estándar cuenta con la opción de cambio dinámico de velocidad (DRS, *Dynamic Rate Shifting*) que permite ampliar la cobertura a unos metros adicionales a cambio de una variación abrupta en la velocidad de transmisión de datos, razón por la cual 802.11p posee diferentes velocidades de transmisión (3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27 Mbps) que se adaptan de acuerdo a las condiciones del medio (intensidad de la señal).

Lo anterior está estrechamente relacionado con la variación del *throughput* el cual también disminuye y por lo tanto reduce la capacidad del sistema. Sin embargo, en la figura 4-4, *Throughput Vs Cobertura* se ilustra lo contrario ya que el *throughput* de la estación receptora, cuya medida se tomó cada 50 mts de distancia, se mantiene relativamente constante y presenta una disminución a partir de las distancias cercanas a 740 mts.

Este comportamiento se puede abordar considerando dos aspectos, el primero está relacionado con la incapacidad del simulador, para realizar un cambio automático de velocidad de transmisión, por lo que debe realizarse manualmente; y el segundo, se debe a que el simulador sólo registra la variación del *throughput* para la velocidad de transmisión escogida, que para este caso es de 27 Mbps.

Por lo tanto, debido a la configuración de las calles en las ciudades colombianas se decidió trabajar con radios inferiores a los 700 mts de cobertura y también por lo que se puede observar en la figura 4-4, *Pérdida de Paquetes Vs Cobertura*, que el porcentaje en la pérdida de paquetes se mantiene constante hasta que la distancia de separación es cercana a los 740 mts, donde el cambio es bastante notorio, así también la variación del retardo solo es perceptible en los límites de los 740 mts, según figura 4-5, ya que estos tres parámetros están estrechamente relacionados.

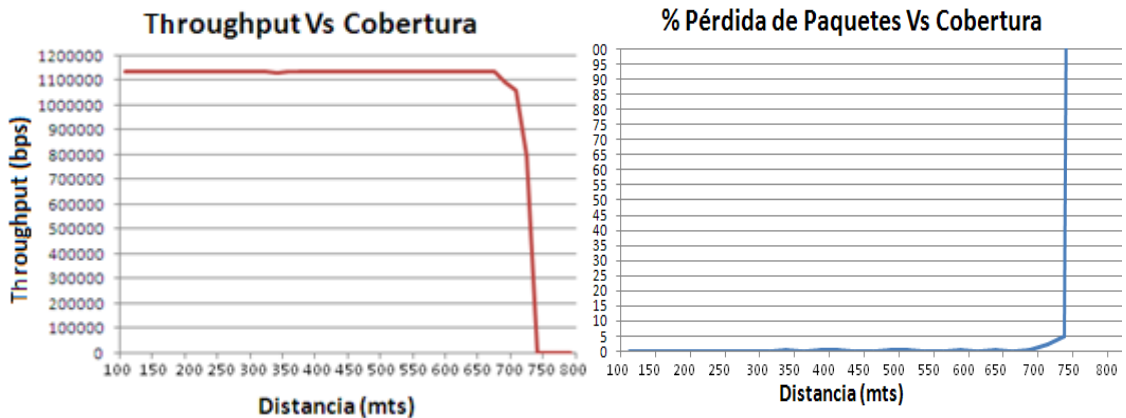


Figura 4-4 Gráficas de Throughput Vs Cobertura y % de Pérdida de Paquetes Vs Cobertura en 802.11p.

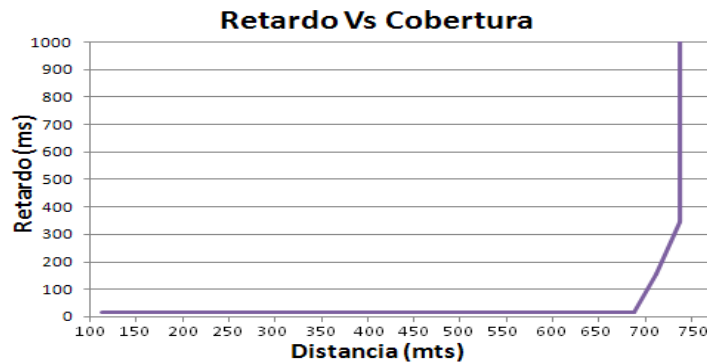


Figura 4-5 Gráfica de Retardo Vs Cobertura en 802.11p.

4.2 ANÁLISIS ESCENARIO URBANO, PRUEBA 1: TRANSMISIÓN DE DATOS PURA ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.

En la simulación se presentan dos sub-escenarios de transferencias de datos, uno usando un enlace punto a punto entre la infraestructura (RSU) y un solo vehículo (OBU) bajo el protocolo TCP y otro usando un enlace punto multipunto entre un RSU y varios OBU bajo el protocolo TCP y se hace el análisis de cómo se afecta el *Throughput* de un OBU, cuando se incrementa el número de OBUs.

En esta medición van considerados también los mensajes de control y la sobrecarga debida a los protocolos. Puesto que el tráfico de datos aquí expuesto es genérico sin ningún limitante, además, el protocolo TCP tiene la capacidad de auto-configurarse para aprovechar todo el canal disponible.

4.2.1 Sub-escenario 1: Enlace Punto a Punto

Para este sub-escenario la Pérdida de Paquetes es cero, y la tasa de transferencia es máxima, ocupando todo el ancho de banda disponible de 6 Mbps, según figura 4-6, puesto que no existe congestión alguna y además la distancia entre el RSU y el OBU es cercana, está entre 200 mts y 282 mts (cuando el OBU se encuentra en las esquinas) ya que el recorrido del OBU es por la periferia del escenario.

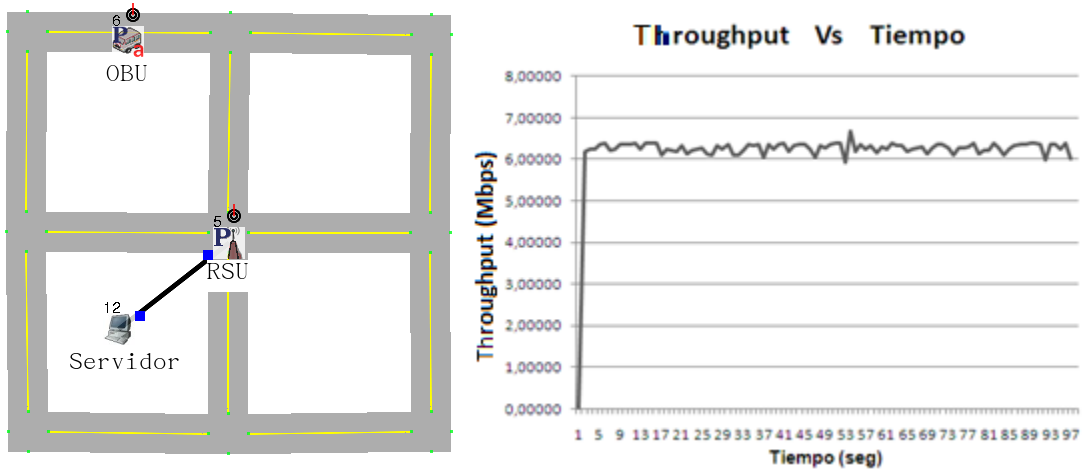


Figura 4-6 Throughput Vs Tiempo en Enlace Punto a Punto.

4.2.2 Sub-escenario 2: Punto Multipunto

En este Sub-escenario, figura 4-7, a partir de la introducción del segundo OBU el *throughput* promedio en cada OBU existente en la red, disminuye gradualmente, como se observa en la figura 4-8, este es un comportamiento esperado ya que el tráfico de información se divide entre el número de usuarios de la red y experimenta variaciones debidas a la naturaleza continuamente cambiante del entorno móvil, pero de igual forma se puede apreciar que a partir de la introducción del noveno OBU, el nivel del *throughput* promedio decae a niveles indeseados hasta el punto de saturar la red, perturbando cualquier servicio ya establecido en ella.

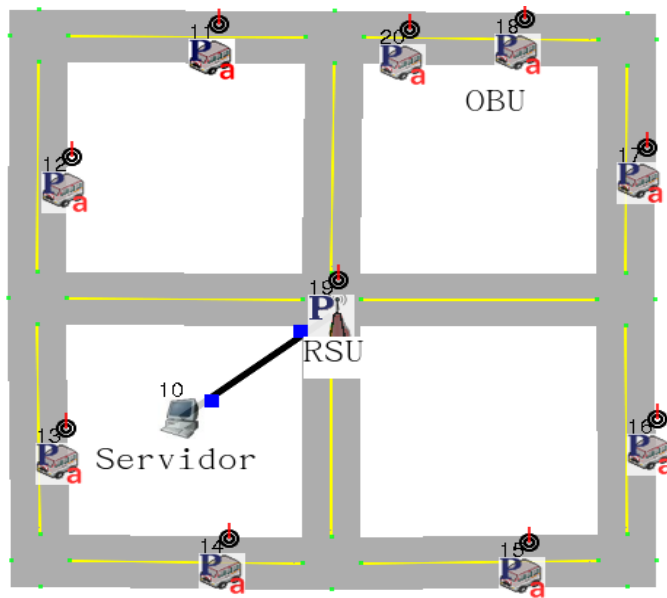


Figura 4-7 Escenario Multicast

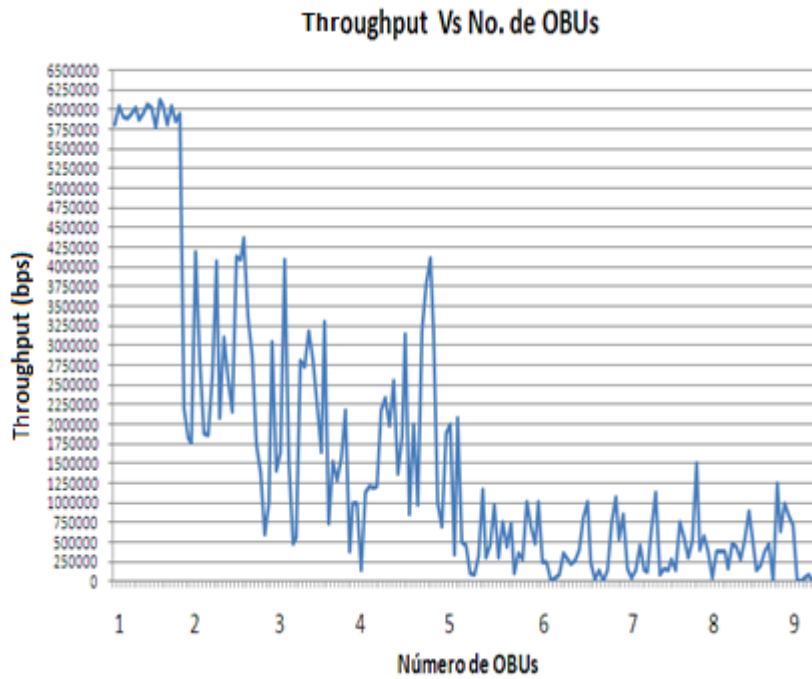


Figura 4-8 Throughput Vs No. de OBUs en un Enlace Punto Multipunto.

4.3 ANÁLISIS ESCENARIO URBANO, PRUEBA 2: TRANSMISIÓN DE VOZ PURA ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.

En la simulación se presentan cuatro sub-escenarios de transmisión de Voz, el primero usando un enlace punto a punto entre la infraestructura (RSU) y un solo vehículo (OBU) bajo el protocolo UDP y utilizando el Códec G.711, el segundo usando un enlace punto multipunto entre un RSU y varios OBU bajo el protocolo UDP y utilizando el Códec G.711 y se hace el análisis de cómo se afecta el *Throughput*, la Pérdida de Paquetes y el Retardo en un OBU, cuando se incrementa el número de OBUs. Igualmente se simulan los sub-escenarios tercero y cuarto pero utilizando el Códec G729.

Aquí se hizo un análisis del tráfico de la carga útil con las cabeceras RTP (12 bytes) y de su afectación en los escenarios expuestos.

4.3.1 Sub-escenario 1: Transmisión punto a punto con códec G.711

En la figura 4-9 se observa que el *Throughput* se mantiene constante y su valor es de 68825 bps, porque no solo se mide la tasa de transferencia del códec G.711, que es de 64 Kbps, sino que también se tienen en cuenta las cabeceras generadas por el protocolo RTP. Además se observa que la pérdida de paquetes es cero y el retardo promedio es igual aproximadamente 19 ms donde el servicio de Voz está dentro de los límites de la recomendación ITU-T G.1010.

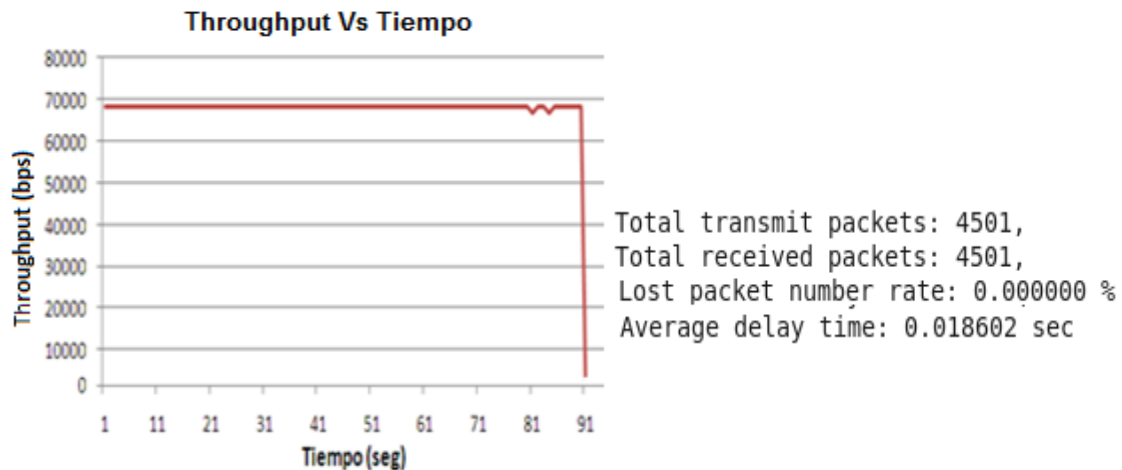


Figura 4-9 Throughput Vs Tiempo y Medición de Pérdida de Paquetes y Retardo en Enlace Punto a Punto de Voz con códec G711.

4.3.2 Sub-escenario 2: Transmisión Punto - Multipunto con códec G.711

En la Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs de la figura 4-10, se puede apreciar como a medida que se involucran más OBUs, cada uno con una llamada de Voz establecida, la Pérdida de Paquetes aumenta lentamente hasta alcanzar 14 OBUs, pero a partir de los 15 OBUs la Pérdida aumenta de forma rápida, superando el umbral del 3%

de paquetes perdidos, que conlleva a una probabilidad muy alta de que las llamadas sean cortadas inesperadamente, pues la referencia para establecer un buen servicio de voz según la recomendación ITU-T G.1010 estipula tener una pérdida por debajo del umbral.

También se observa, que entre los 13 y 14 OBU el *throughput* se desestabiliza pero la Pérdida y el Retardo de los paquetes aún están entre los límites de aceptación del servicio de voz, también se ve que el *throughput* de cada llamada se ve afectado enormemente a partir de los 15 OBUs, según la gráfica *Throughput Vs Número de OBUs* de la figura 4-10, desde aquí las llamadas se hacen inteligibles o entrecortadas, por la falta de datos. La voz con este códec debe tener 50 tramas por segundo. Esto deja un tiempo máximo de compresión / descompresión de 40 ms (aunque puede ser menor). Restando a 150 ms deja un retardo máximo de 110 ms para la transmisión en la red. Asumiendo que las rutas de tres saltos WLAN-WAN-WLAN o LAN-WAN-WLAN son unas topologías frecuentes, y teniendo en cuenta que los elementos de enlace (*gateways, routers, etc.*) también contribuyen al retardo, queda un máximo aceptable de 30 ms a 35 ms de retardo por salto.

Aunque estos cálculos son aproximados y dependerían de muchos otros factores, sirven como una aproximación a los problemas de la transmisión. Si bien el retardo para los 15 OBUs aún se encuentra en el rango admitido por la recomendación ITU-T G.1010, según figura 4-11, el servicio prestado bajo las condiciones de pérdidas ya expuestas sería de mala calidad a partir de ese número de OBUs.

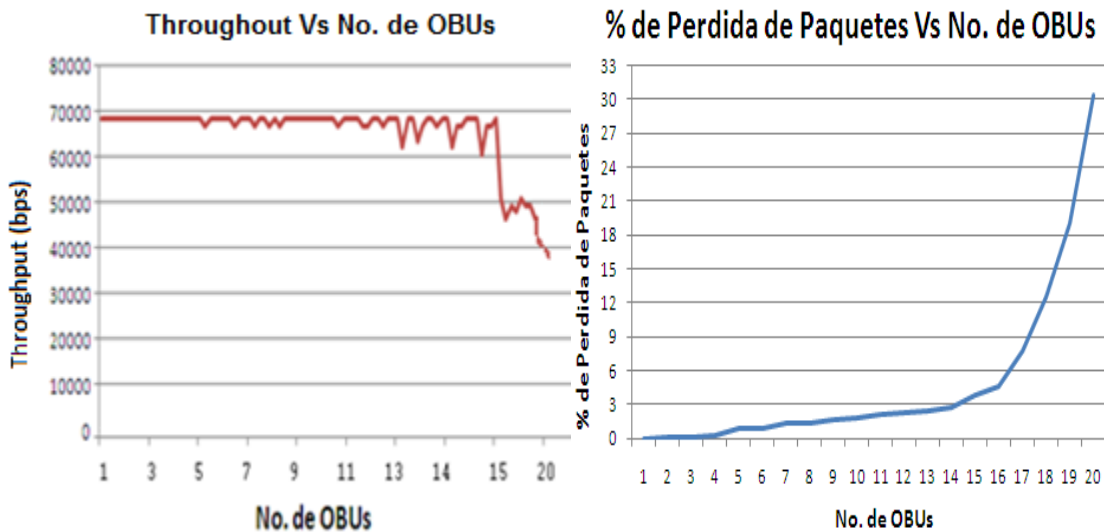


Figura 4-10 Throughput Vs Número de OBUs y Porcentaje de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G.711.

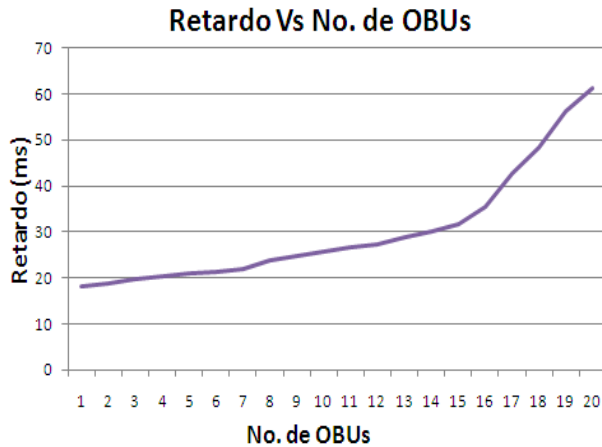


Figura 4-11 Retardo Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G.711.

4.3.3 Sub-escenario 3: Transmisión Punto a Punto con códec G.729

En la figura 4-12 se observa que el *Throughput* se mantiene constante y su valor es de 12800 bps, porque no solo se mide la tasa de transferencia del códec G.729, que es de 8 Kbps, sino que también se tienen en cuenta las cabeceras generadas por el protocolo RTP. Además se observa que la pérdida de paquetes es cero y el retardo promedio es aproximadamente igual a 18 ms donde el servicio de Voz está dentro de los límites de la recomendación ITU-T G.1010.

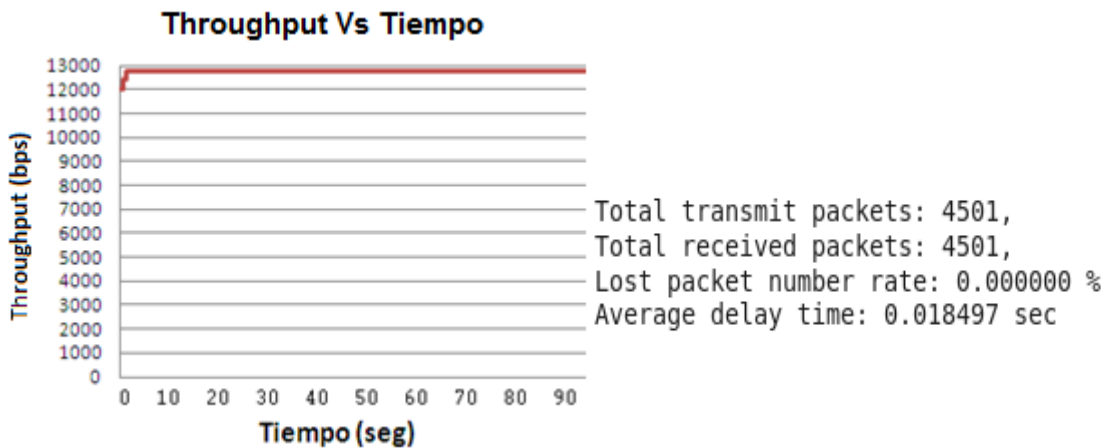


Figura 4-12 Throughput Vs Tiempo y Medición de Pérdida de Paquetes y Retardo en Enlace Punto a Punto de Voz con códec G.729.

4.3.4 Sub-escenario 4: Transmisión Punto – Multipunto con códec G.729

En la figura 4-13, de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs se puede apreciar como a medida que se involucran más OBUs, cada uno con una llamada de Voz establecida, la Pérdida de Paquetes aumenta lentamente hasta alcanzar 18 OBUs, pero a partir de los 19 OBUs la Pérdida aumenta de forma rápida, superando el umbral del 3% de paquetes

perdidos, que conlleva a una probabilidad muy alta de que las llamas sean cortadas inesperadamente, pues, la referencia para establecer un buen servicio de voz según la recomendación ITU-T G.1010 estipula tener una pérdida por debajo del umbral. También se observa, que entre los 6 y 18 OBU's el *throughput* se desestabiliza levemente y no afecta sustancialmente la calidad del servicio de voz, además, la pérdida de paquetes y el retardo están dentro de los límites de aceptación del servicio, posteriormente el *throughput* de cada llamada se ve afectado enormemente a partir de los 19 OBU's, según la gráfica *Throughput Vs Número de OBU's*, desde aquí las llamadas se hacen inteligibles o entrecortadas, por la falta de datos. Aunque el retardo aún se encuentra en el rango admitido por la recomendación ITU-T G.1010, según figura 4-14, el servicio prestado bajo las condiciones de pérdidas ya expuestas sería de mala calidad a partir de los 19 OBU's, por iguales razones ya expuestas en el sub-escenario 2 de este apartado.

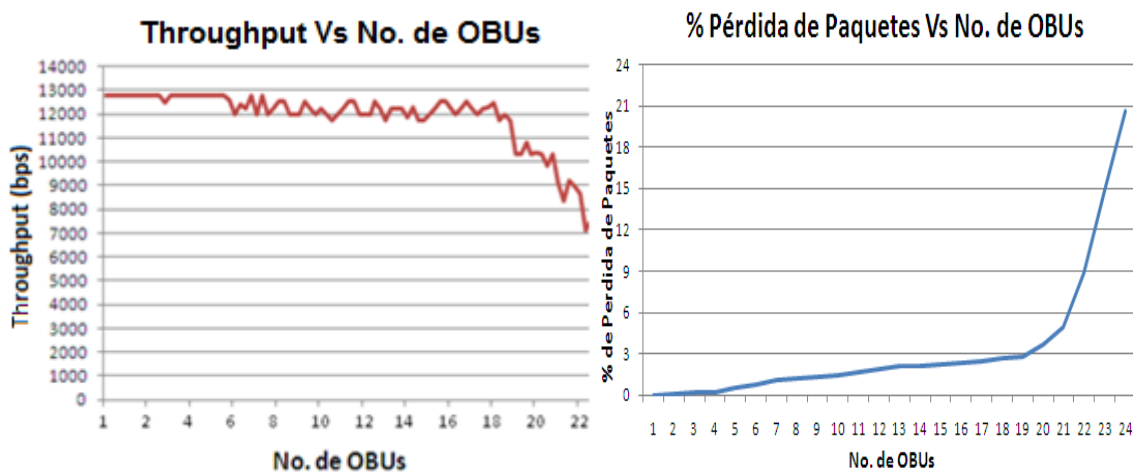


Figura 4-13 Throughput Vs Número de OBU's y Porcentaje de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBU's en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G.729.

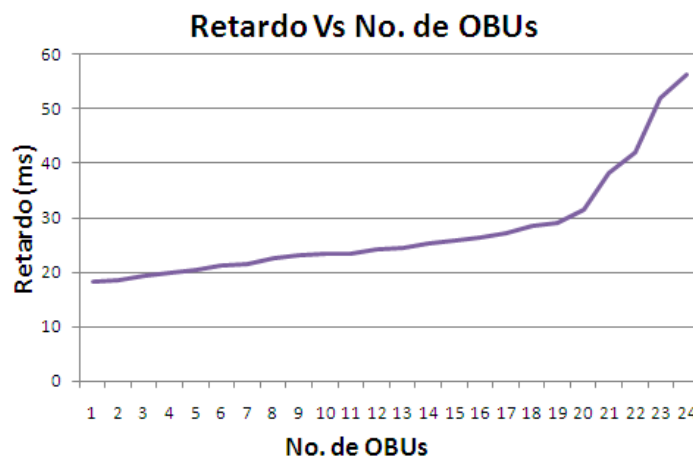


Figura 4-14 Retardo Vs Número de OBU's en Enlace Punto Multipunto de Voz con códec G729

En estos 4 sub-escenarios se ha hecho un análisis similar donde se observa que la diferencia en los niveles de *throughput* es notable debido a que el tamaño de la carga útil del códec G.729 es muy bajo comparado con el de G.711. Sin embargo, el comportamiento de esta variable, indicado en la figura 4-8, demuestra que su variación es más lenta a medida que aumenta el número de estaciones. Para explicar este hecho es necesario retomar lo explicado en el capítulo 2 en donde se menciona a la Ventana de Contienda cuya función principal es la de notificar a su estación que el medio se encuentra virtualmente libre, una vez el contador se haya actualizado y decrementado, de acuerdo a la información obtenida de la trama MAC.

Este valor es mapeado por la estación que gana el acceso al medio y contiene el tiempo de transmisión estimado de acuerdo al tamaño del paquete de datos que está ingresando a la capa MAC. A partir de lo anterior, se puede deducir que, puesto que el tamaño de las muestras del códec G.729 es menor que el del G.711, el tiempo de transmisión será menor así también en el resto de estaciones. Todo esto se ve reflejado en la disminución del tiempo de espera, en el incremento de la probabilidad de acceso al medio y en la posibilidad de transmitir los paquetes a la misma velocidad de generación de bits del *códec*, es decir, se reduce la probabilidad de que se pierdan paquetes y se puede mantener un nivel de *throughput* relativamente constante.

De esta manera, lo anterior demuestra como el bajo ancho de banda consumido por el códec G.729 influye sobre la capacidad del sistema. Sin embargo, a pesar de contar con tiempos de ocupación muy bajos, en la misma figura 4-8 se puede observar como a medida que el número de estaciones que transmiten se acerca a 19 el valor del *throughput* comienza a decrecer. En este caso el número de estaciones juega un papel importante ya que la competencia por el medio es cada vez más difícil y por lo tanto el retardo es cada vez mayor.

Finalmente se concluye que a nivel de una celda, cuyo RSU tiene un patrón omnidireccional, un adecuado radio de cobertura se da cuando este es inferior a 740 mts bajo el cual la capacidad de la celda se ve afectada según el tipo de *códec* utilizado presentando el códec G.729 un mejor desempeño debido al bajo consumo de ancho de banda. De la misma manera, se dedujo la importancia del efecto del retardo a medida que se aumenta el número de estaciones y cómo estos tres parámetros están estrechamente relacionados

4.4 ANÁLISIS ESCENARIO URBANO, PRUEBA 3: TRANSMISIÓN DE VIDEO IP PURA ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.

En esta simulación se presentan 2 sub-escenarios de transmisión de Video, el primero usando un enlace punto a punto entre la infraestructura (RSU) y un solo vehículo (OBU) bajo el protocolo UDP y utilizando el códec MPG-4 versión 10 o H.264/AVC, el segundo usando un enlace punto multipunto entre un RSU y varios OBUs bajo el protocolo UDP y utilizando el códec MPG-4 versión 10 y se hace el análisis de cómo se afecta el *Throughput*, la Pérdida de Paquetes y el Retardo en un OBU, cuando se incrementa el número de OBUs.

Cabe notar que la configuración del códec, se escoge con base en las características del servicio de video llamada utilizado en telefonía celular, debido a que es la configuración

más pequeña en cuanto a tamaño de paquete y que brinda un buen servicio y desempeño. Además, se tiene en cuenta del anterior análisis de voz, que el mejor desempeño se da cuando la exigencia de ancho de banda es menor y también por la similitud de las características del tráfico utilizado.

Configuración del códec:

- Tamaño de pantalla en pixeles = $176 \times 144 = 25344$ pixeles.
- Cuadros por segundo: 30 según formato *NTSC*⁸, utilizado en gran parte de América, incluido Colombia.
- Número de bits por pixel = 16, color verdadero.
- Carga útil sin comprimir será = $25344 \times 16 = 405504$ bits.
- Factor de Compresión = 60, este factor podría ir desde 1 a 200 [71]
- Carga útil del paquete = $405504/60 = 6758$ bits = $6768/8 = 844$ bytes.

Aquí se hará un análisis del tráfico de la carga útil con las cabeceras RTP (12 bytes) y de su afectación en los escenarios expuestos.

Debido a que no se ha encontrado recomendaciones de desempeño por parte de organismos de estandarización en la transmisión de Video IP sobre redes de datos, este trabajo se acoge a la recomendación de desempeño para servicios en tiempo real como la recomendación ITU-T G.1010, pero además se ha investigado la naturaleza del ojo humano de donde se obtuvo que al mirar un video de forma fluida el ojo percibe hasta 24 cuadros⁹ por segundo y a partir de aquí el ojo no nota los cambios [72] [73].

4.4.1 Sub-escenario 1: Transmisión punto a punto de Video IP

En la figura 4-15 se observa que el *throughput* se mantiene constante y su valor es de 207313 bps. Además, la pérdida de paquetes es cero y el retardo promedio es aproximadamente igual a 13 ms donde el servicio de Video IP está dentro de los límites de la recomendación ITU-T G.1010 para servicios en tiempo real.

⁸ NTSC: Comité Nacional de Estándares de Televisión (del inglés *National Television System Committee*).

⁹ Se denomina cuadro, en inglés, *frame*, a un fotograma, una imagen particular dentro de una sucesión de imágenes que componen una animación. La continua sucesión de estos fotogramas producen a la vista la sensación de movimiento, fenómeno dado por las pequeñas diferencias que hay entre cada uno de ellos.

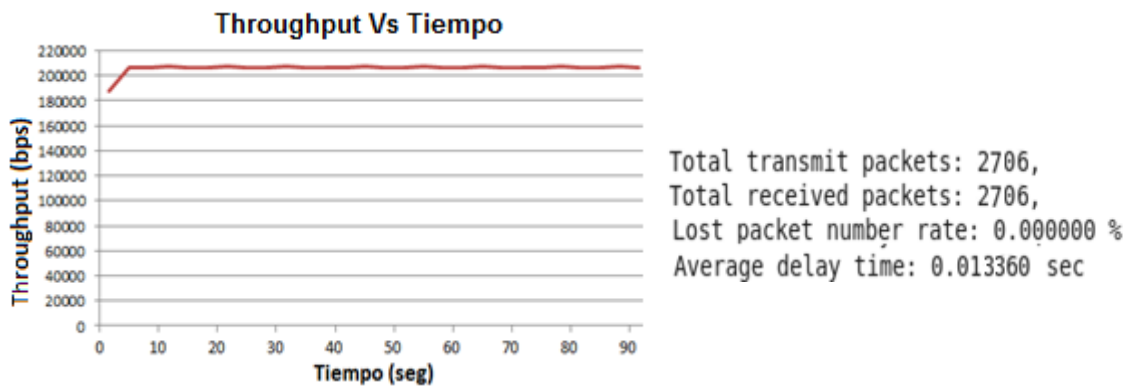


Figura 4-15 Throughput Vs Tiempo, Medición de Pérdida de Paquetes y Retardo en Enlace Punto a Punto de Video IP.

4.4.2 Sub-escenario 2: Transmisión punto multipunto de Video IP

En la figura 4-16 se observa que a partir de la introducción del décimo OBU en el enlace de Video IP, la pérdida de paquetes es de 3,23 %, por lo cual se supera el umbral del 3%, de la recomendación ITU-T G.1010 para servicios en tiempo real, y si se tiene en cuenta esta recomendación, el servicio ya presenta inconvenientes para la transmisión de un servicio de calidad, pero al hacer un análisis más a fondo del comportamiento del video, como se hizo anteriormente, donde se habla de la percepción del ojo humano, se concluye que: la transmisión de la simulación es de 30 cuadros por segundo, que para este caso son 30 paquetes por segundo, por lo tanto si el ojo humano solo detecta cambios si la frecuencia de cuadros es inferior a 24 fps, entonces la perdida aceptable de paquetes (cuadros) es del 20%, incrementando en gran medida el umbral de la recomendación de la ITU-T, de tal forma que se podría pensar en introducir hasta doce (12) OBUs en donde la pérdida de paquetes es de 8,13% (porque el de los trece OBUs es de 23.61%), pero aún se debe analizar la figura 4-17, de donde se puede ver que el retardo del décimo segundo OBU es de 55,12 milisegundos, y según lo planteado en el apartado 4.3.2 el límite de retardo debe ser inferior de 35 milisegundos, entonces, esto limita a once (11) el número de OBUs que pueden participar en la prestación del servicio de Video IP propuesto, ya que el retardo de los once OBUs es de 31,53 milisegundos, y no se vería afectada la fluidez del Video y por tanto la calidad del servicio.

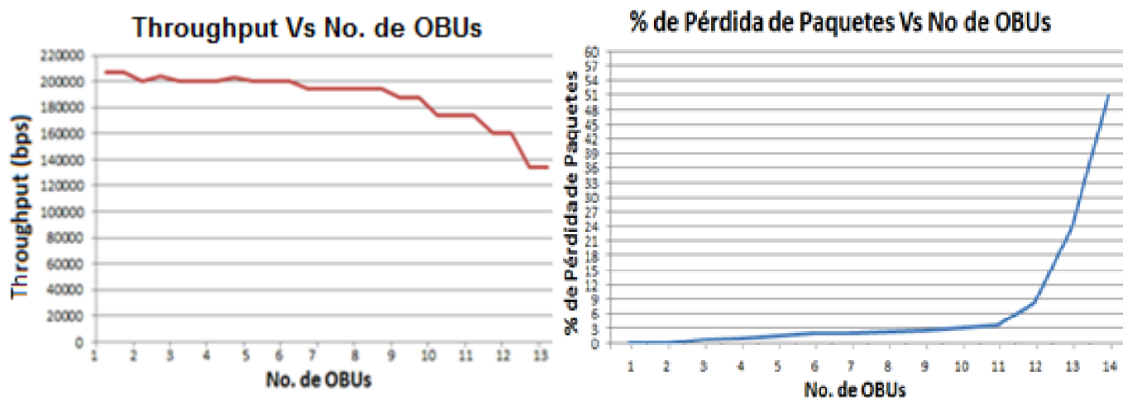


Figura 4-16 Throughput Vs Número de OBUs y Porcentaje de Pérdida de Paquetes Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Video IP.

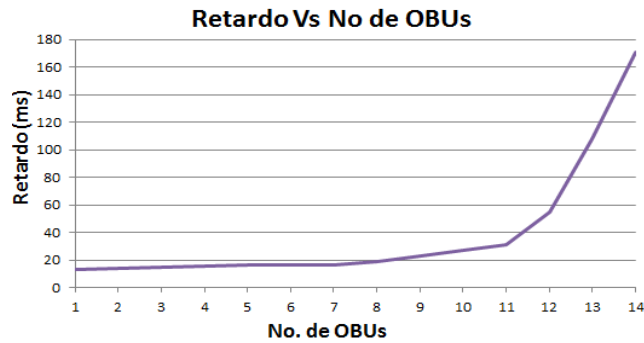


Figura 4-17 Retardo Vs Número de OBUs en Enlace Punto Multipunto de Video IP.

4.5 ANÁLISIS DEL ESCENARIO URBANO, PRUEBA 4: TRANSMISIÓN DE VIDEOCONFERENCIA (VOZ, VIDEO IP y DATOS), ENTRE VEHÍCULO E INFRAESTRUCTURA EN 802.11P.

Como se analizó anteriormente en el apartado 4.3, el códec de Voz que brinda mejor desempeño es el G729, de donde se obtuvo que se puedan soportar hasta 18 sesiones sin problemas. También se analizó que las sesiones de Video IP que se soportan en 802.11p son 11, por lo tanto un servicio completo de Videoconferencia es en el que se establezcan igual número de sesiones de Voz y Video y opcionalmente Datos.

4.5.1 Sub-escenario 1: Sin calidad del servicio

Tabla 4-1 Voz, Video IP y Datos sin QoS y con transmisión simultánea.

	VOZ	VIDEO	DATOS
Retardo (ms)	44,79	37,56	-----
% Pérdida de Paquetes	22,29	22,16	-----
Throughput (bps)	9956	160960	10442

En este sub-escenario, los tres servicios compiten por acceso al medio en igualdad de condiciones y es por lo cual las mediciones de la tabla 4-1 los presentan como servicios en malas condiciones, en Retardo, Pérdida de Paquetes y *Throughput*.

4.5.2 Sub-escenario 2: Con calidad del servicio

Tabla 4-2 Voz, Video IP y Datos con QoS y con transmisión simultánea

	VOZ	VIDEO	DATOS
Retardo (ms)	23,55	21,81	-----
% Pérdida de Paquetes	0,54	4,25	-----
Throughput (bps)	12498	193015	2828

En este sub-escenario, los tres servicios compiten por el acceso al medio con diferentes niveles de prioridad y es por lo cual las mediciones de la tabla 4-2 los presentan como servicios en mejores condiciones que los de la tabla 4-1, pero no a todos, el servicio de datos se ve mayormente afectado ya que su nivel de prioridad es inferior al de los demás, también cabe notar que bajo estas condiciones el desempeño de la Voz y el Video IP es mejor que el analizado anteriormente en los apartados 4.3.4 y 4.4.2 para igual número de OBUs participantes en el análisis, esto se debe a que en los anteriores casos los demás servicios de Voz para el caso de 4.3.4 compiten en iguales condiciones de prioridad, de la misma forma para el Video IP en 4.4.2, y en este sub-escenario la prioridad es diferente e inclusive superior.

Entre las características más notables del estándar 802.11p se encuentra la capacidad de proporcionar un tratamiento privilegiado a las aplicaciones como Voz y Video frente a las aplicaciones de Datos. Como se mencionó en el capítulo 2, esto se consigue mediante la asignación de un tiempo de espera adecuado (AIFS) que incrementa la posibilidad de acceso al medio inalámbrico de una manera más rápida retardando en cierta medida el acceso de las aplicaciones con tráfico de datos. Esto se puede apreciar al comparar las tablas 4-1 y 4-2 en donde se observa que para once (11) OBUs con tráfico de Voz, Video IP y Datos soportado por un RSU se ve afectado si no se utiliza QoS. Sin embargo, cuando existen 11 OBUs simultáneamente con tráfico de Voz, Video IP y Datos el *throughput* de este último se deteriora aún más, cuando se utiliza QoS, puesto que la frecuencia de ocupación del medio por parte de los servicios AC_Voz (Categoría de acceso 3) y AC_Video (Categoría de acceso 2) aumenta considerablemente al transmitir tramas con mayor prioridad. Este efecto se podría hacer menos notorio y perjudicial cuando se disminuye el número de servicios de datos. En cuanto al retardo y pérdida de paquetes, el simulador no permite una medición clara de estos atributos en TCP, como ya se había dicho anteriormente.

Como se mencionó, los datos están muy degradados debido a la baja prioridad, por lo tanto se disminuyeron los OBUs con este tráfico para determinar cuántos OBUs se soportan, de tal forma que se preste en condiciones aceptables sin sacrificar el número de OBUs con Voz y Video IP antes expuestos (11 OBUs), tal disminución llega hasta el mínimo de un OBU con el servicio de Datos en condiciones aceptables, 130.000 bps.

Por lo cual se deduce que la opción más acertada para acondicionar el servicio de Datos bajo las condiciones de este escenario, es la de modificar parámetros como el AIFS, CWmin y CWmax entre otros, de los servicios de Voz, Video y Datos, y así establecer una mejor configuración, dando mejores condiciones de competencia del medio para los datos, pero estos cambios no son posibles en las condiciones del simulador, entonces este análisis se deja para posteriores estudios, fuera del alcance de este trabajo de grado.

4.6 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN EN EL DESEMPEÑO CUANDO EXISTE CAMBIO DE CELDA (HANDOVER) ENTRE 802.11b Y 802.11p.

En estos sub-escenarios, igualmente que en el apartado 4.1, se escogió un paquete de tamaño de 1450 bytes (MTU < 1500 bytes) cada 10 ms, esto para simular la más alta condición de sobrecarga que se puede establecer en UDP bajo las condiciones del simulador.

4.6.1 Sub-escenario 1, Handover en 802.11b.



Figura 4-18 Proceso de Handover con 802.11b.

Tabla 4-3 Medición de desempeño en proceso de *Handover* con 802.11b.

	Mínimo	Máximo
Retardo (ms)	998	1213
Paquetes Perdidos	92	
<i>Throughput</i> (bps)	226562	

Los datos aquí recopilados en la tabla 4-3 se toman del grupo de datos de medición que se identifican al inicio y al final del proceso de *handover*, la identificación se detecta cuando se produce un cambio abrupto en los datos que mantienen un margen constante en su variación y por el intervalo de tiempo en el cual sucede el ingreso y salida del OBU en el sector de cambio de celda señalado en la figura 4-18. Este proceso se repite en el siguiente sub-escenario.

4.6.2 Sub-escenario 2, Handover en 802.11p.

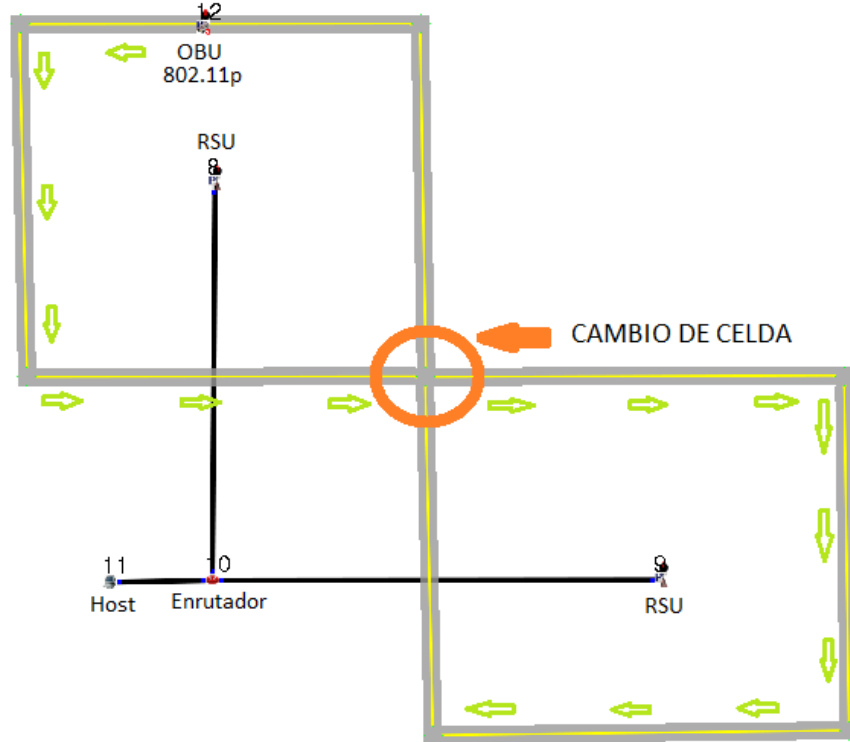


Figura 4-19 Proceso de Handover con 802.11p.

Tabla 4-4 Medición de desempeño en proceso de Handover con 802.11p.

	Mínimo	Máximo
Retardo (ms)	678	945
% Pérdida de Paquetes	71	
Throughput (bps)	328956	

En las figuras 4-18 y 4-19 se observa que en el recorrido del OBU existe una zona en la cual se produce el cambio de celda, aquí existe la influencia de dos RSU sobre el OBU que se encuentra en ella, al avanzar el OBU experimenta una degradación de señal proveniente desde el campo de cobertura del RSU que se abandona y también se experimenta el incremento en la intensidad de la señal del campo de cobertura del RSU al que se está ingresando; aquí es donde se produce el Handover, el objetivo del análisis es comparar el desempeño existente entre la enmienda 802.11p y la enmienda 802.11b¹⁰, en el proceso de *Handover* con la medición de Paquetes Perdidos, Retardo y *Throughput*.

¹⁰ Enmienda que se utiliza por condiciones del simulador y porque es la más utilizada en Vanets después de 802.11p, dentro de la tecnología WIFI.

En este caso no se configura ningún protocolo de enrutamiento puesto que la herramienta de simulación no permite su configuración bajo el estándar 802.11p y por tanto se compara bajo iguales condiciones en las dos enmiendas.

Al comparar las tablas 4-3 y 4-4, se puede ver que el proceso de *handover* en 802.11p se realiza de mejor manera, pues, está es la ventaja principal a la cual le apuntan los diseñadores de la nueva enmienda, por lo cual se han suspendido los procesos de autenticación y asociación que hacen parte del proceso de *handover* en las enmiendas derivadas de 802.11, de allí que se tiene un mejor desempeño. Comparando los datos obtenidos en los dos sub-escenarios se podría decir que 802.11b ofrece aproximadamente un 80% del desempeño de 802.11p en el proceso de *handover*.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente la valoración del desempeño propuesto en el tercer objetivo se encuentra completamente justificada mediante el detallado análisis realizado en los diferentes escenarios. Además, dado que este trabajo de grado está orientado hacia una estimación de la viabilidad del sistema en cuanto a la prestación de servicios de Voz, Video IP y Datos, se muestra el número de usuarios que cada RSU está en capacidad de soportar primordialmente en servicios de tiempo real como lo es en una Video-conferencia en un entorno de una celda.

Es así como a través de este capítulo se realizaron simulaciones que permitieron el estudio del comportamiento de las variables como el throughput, retardo y pérdida de paquetes en distintos escenarios. De esta manera y con el apoyo de la investigación de los anteriores capítulos se logró el objetivo general propuesto.

5. CONCLUSIONES

- Las redes inalámbricas WAVE que están soportadas en 802.11p constituyen una de las mejores soluciones para la comunicación y desarrollo de la ITS, puesto que sus características de escalabilidad, flexibilidad, auto configuración y auto regeneración aportan múltiples beneficios en la implementación de sistemas de comunicación de entornos totalmente móviles que generalmente imponen restricciones de costo, alcance, disponibilidad, redundancia y flexibilidad en sus implementaciones.
- Principalmente se puede afirmar que es posible realizar la comunicación con servicios en tiempo real entre vehículos y la infraestructura, en condiciones aceptables, como se pudo comprobar en los escenarios simulados.
- Durante el desarrollo de este trabajo de grado se recopilaron los conceptos relacionados con WLAN, MANET, VANET, VoIP, Video IP con el propósito de generar una base teórica que permita identificar sus principales inconvenientes y ventajas, convirtiéndose estas últimas en un soporte para la generación de criterios para el diseño de una red VANET en entornos con servicios en tiempo real, ya que se verificó la viabilidad de estos bajo el estándar IEEE 802.11p.
- Mediante el estudio detallado del estándar 802.11p y del impacto de la elección del tamaño de la carga útil para la Voz, el Video IP y Datos sobre el ancho de banda se logró realizar una estimación experimental del número de OBUs que cada RSU puede soportar con cada servicio, es decir, se realizó un dimensionamiento del servicio de Voz, Video IP y Datos sobre una celda WAVE. Por lo tanto se determina el número de OBUs que puede soportar un RSU con servicio aceptable en la tabla 5-1.

Tabla 5-1 Número de OBUs por Celda.

	Voz	Video IP	Datos
No. OBUs	18	11	8

- En los resultados es notorio que el *throughput* se ve afectado con el protocolo de transporte que se utilice, es decir, cuando el protocolo es TCP o UDP. Cuando el protocolo de transporte es TCP los valores de *throughput* tienden a ser mayores, debido a que el protocolo se adecua a las condiciones del medio y porque el medio no posee ninguna restricción y control. En cambio en UDP son menores debido a que hay garantía en cuanto a tamaño de paquete y frecuencia de envío, puesto que se predeterminan para cada servicio, pero además en el momento de priorizar el tráfico sucede lo contrario, dejando a los datos que utilizan TCP por debajo, pues, estos poseen menor prioridad de acceso al medio y además disponen de un control de errores y de entrega de los paquetes de datos produciendo una sobrecarga de información. Mientras que el protocolo UDP presenta valores más altos de *throughput*, pues tiene mayor prioridad y en algunos casos no se tiene la confiabilidad en la entrega de los paquetes, se acepta un margen de error.
- Se demostró a nivel de simulación, la capacidad que tiene 802.11p en la transmisión de servicios de tiempo real y el impacto en el tamaño de la carga útil sobre el número

de OBUs por RSU; obteniendo un máximo de 18 OBUs al hacer uso del códec G.729 en una celda con patrón omnidireccional imponiéndose así sobre el códec G.711 que presenta un elevado consumo de ancho de banda y teniendo en cuenta lo anterior, se determinó que el servicio de Video IP que se simuló debe ser el de mayor uso y de menores requerimientos de ancho de banda en condiciones aceptables como es el usado en video llamadas de la telefonía celular.

- La Voz y el Video IP en VANETs son algunos de los servicios que se prevén brindar, sin embargo, como se concluyó, en el momento de su implementación es importante tener en cuenta ciertos aspectos que determinan la calidad en su transmisión, entre estos se encuentran la escogencia de un códec 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, el factor que más afecta al retardo de la comunicación es el proceso de *Handover*, donde es necesario introducir un buen protocolo de enrutamiento para lograr encaminar los servicios sin caer en retardos tan elevados, como los simulados, y permitir que la comunicación sea fluida.
- A nivel de una celda, el comportamiento de 802.11p frente a la utilización o no del método EDCA para la transmisión simultánea de Voz, Video IP y Datos, presenta una gran diferencia y ventaja respecto del estándar original, cuando se trata de brindar QoS.
- Las Herramientas de Simulación son ideales para el estudio y validación del comportamiento de protocolos y aplicaciones ante la imposibilidad de la implementación real. Además, permite estudiar los parámetros, propiedades y funcionamiento de los sistemas en diferentes pruebas, de manera más cómoda y económica, para tener una base preliminar en la determinación de la conveniencia de una tecnología para un fin en particular.
- La herramienta NCTUns 6.0 se seleccionó para la simulación de diferentes escenarios de prueba, ya que demostró ser una herramienta útil y versátil para la simulación de redes WAVE. Además, tiene 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.
- Con el objetivo de verificar si las redes WAVE son aptas para la transmisión de Voz, Video IP y Datos, se realizaron pruebas experimentando en configuraciones V2I y descartando escenarios no aptos como la configuración V2V como se explica en 4.1, de tales pruebas se recogieron datos que de donde se puede decir: que una red WAVE bajo su configuración por defecto y en condiciones libres de obstáculos e interferencias es posible brindar condiciones aceptables de QoS, pero debido a algunas limitantes del simulador no se logró ampliar el estudio en mayor número de escenarios.

- Debido a que 802.11p en WAVE se crea con el ánimo de transmitir mensajes cortos, no se han establecido estudios anteriores a este trabajo de grado sobre la capacidad en la transmisión de servicios en tiempo real, tan solo hay estudios en enlaces punto a punto, pues, el concepto de transmitir servicios de tiempo real a más de un usuario o entre distintos usuarios no se ha contemplado por parte de los desarrolladores de la tecnología y también de NCTUns 6.0.
- Al comparar la eficiencia en el desempeño del proceso de Handover entre las enmiendas 802.11p y 802.11b, se determina que 802.11p es más eficiente.
- Para la implantación de redes WAVE es muy importante la planeación adecuada de la red en cuanto a cobertura, manejo de potencia de los transmisores para evitar de esta forma pérdida de paquetes por condiciones como la distancia, la dispersión y los posibles obstáculos.

6. RECOMENDACIONES

En este trabajo de grado se abre una puerta sobre tema de redes vehiculares con WAVE, el cual está en investigación a nivel mundial. Se espera que con el desarrollo de dispositivos con la norma 802.11p se dé continuidad al estudio de este nuevo sistema de comunicaciones que brinda muchas soluciones y beneficios sociales y crear nuevas oportunidades de negocio.

Esta tecnología necesita para su implementación investigación y desarrollo en varios aspectos, tales como:

- La seguridad e integridad de los datos de usuario que viajan a través de la red
- El mejoramiento de las condiciones de radio.
- La regulación dentro del Ministerio de Comunicaciones
- La apertura del espectro.
- La definición de un protocolo de enrutamiento que se ajuste a las condiciones cambiantes de este tipo de redes.
- El desarrollo de hardware a nivel de diseño de los equipos que serán instalados en los vehículos para cumplir con la transmisión y recepción de la información.
- El desarrollo de nuevas aplicaciones que brinden mayor comodidad y seguridad tanto a los conductores como a su entorno.
- La aplicación de ésta tecnología a nivel rural.

7. REFERENCIAS

- [1] Research and Innovative Technology Administration (RITA), "Vehicle Infrastructure Integration Proof of Concept Executive Summary," *U.S. Department of Transportation (US DOT)*, 2009. Disponible en: <http://www.its.dot.gov/index.htm>. [Visitada: Febrero, 2010].
- [2] E. Fernández, "Wi-Fi: Nuevos Estándares en Evolución," *Centro de Difusión de Tecnologías ETSIT-UPM*, Enero 2007. Disponible en: <http://www.ceditec.org> [Visitada: Febrero, 2010].
- [3] U.S. Department of Transportation's (DOT's), "IEEE 802.11p," *US department of transportation*, Septiembre, 2009. Disponible en: <http://www.standards.its.dot.gov/> [Visitada: Febrero, 2010].
- [4] J. Blau, "Car Talk". Revista *Spectrum*, IEEE, Junio 2009. Disponible en www.spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/car-talk [Visitada: Marzo, 2010].
- [5] ITS Colombia. 2010. Página web disponible en <http://www.its-colombia.org/index.html> [Visitada: Marzo, 2010].
- [6] F. Kuhlmann y A. Alonso, "Información y Telecomunicaciones," *Fondo de cultura económica*. México. 2000. Disponible en: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>. [Visitada: Abril, 2010].
- [7] P. López. "Comparativa de Tecnologías Emergentes de Acceso a Redes Móviles y Fijas," *Universidad de Chile*. Santiago de Chile. Julio 2007. [Consultado: Febrero 2011].
- [8] M. Weigle, "Standards: WAVE / DSRC / 802.11p", *Old Dominion University*, 2008. Disponible en <http://www.cs.odu.edu/~mweigle/courses/cs795-s08/lectures/5c-DSRC.pdf> [Visitada: Abril, 2010].
- [9] U.S. Department of Transportation's (DOT's), "IntelliDrive," *US department of transportation*, 2010. Disponible en: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/> [Visitada: Septiembre, 2010].
- [10] Institute of Electrical and Electronic Engineers. "IEEE Standard for Information Technology, Telecommunications and Information Exchange Between Systems, Local and metropolitan area networks, Specific requirements. Parte 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Computer Society*, 2007. [Consultado: Julio 2010].
- [11] F. Hoyos, "Descubrimiento de Servicios y Routing en Redes Manet con Dispositivos Maemo." *Universidad Carlos III de Madrid*, Madrid. 2009. [Consultado: Febrero 2011].
- [12] W. Xiang, P. Richardson y J. Guo. "Introduction and preliminary experimental results of wireless access for vehicular environments (WAVE) systems," *Universidad de Michigan*, Dearborn. 2009. [Consultado: Enero 2011].

-
- [13] D. Remondo y I. Niemegeers, "Ad hoc networking in future wireless communications," *Computer Communications*, vol 26, no. 1, pp. 36-40. 2003. [Consultado: Marzo 2010].
- [14] M. Domingo. "Diferenciación de servicios y mejora de la supervivencia en redes ad hoc conectadas a redes fijas." Universidad politécnica de Cataluña. 2005. [Consultado: Abril 2010].
- [15] "Los riesgos relacionados con las redes inalámbricas." Disponible en: <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifisecu.php3> [Visitada: Marzo 2010].
- [16] Institute of Electrical and Electronic Engineers. "IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks, Specific requirements. Parte 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 6: Wireless Access in vehicular environments" *IEEE Computer Society*, 2010. [Consultado: Septiembre 2010].
- [17] J. Vinagre, "Teoría de Encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas," *Universidad Carlos III*, Madrid, 2007. [Consultado: Junio 2010].
- [18] I. Mohammad, "The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks," *CRC Press, Florida Atlantic University*, Boca Raton, Florida, 2003. [Consultado: Junio 2010].
- [19] B. Stefano, C. Marco, G. Silvia y S. Ivan, "Mobile Ad Hoc Networking," *IEEE Press, Wiley-Interscience*, 2004. [Consultado: Mayo 2010].
- [20] J. Chalmeta, "Estudio y análisis de prestaciones de redes móviles Ad Hoc mediante simulaciones NS-2 para validar modelos analíticos." *Universidad Politécnica de Cataluña*, Barcelona, Noviembre 2009. [Consultado: Septiembre 2010].
- [21] I. Lequerica, "Comunicaciones en el entorno del automóvil," *Telefónica I+D*, Madrid, 2007. [Consultado: Agosto 2010].
- [22] M. Cimoli, "Las TIC para el crecimiento y la igualdad: renovando las estrategias de la sociedad de la información." *Condición Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL*, Nueva York, 2010. [Consultado: Febrero 2011]
- [23] J. Burbank, P. Chimento, B. Haberman, W. Kasch, y J. Hopkins, "Key Challenges of Military Tactical Networking and the Elusive Promise of MANET Technology". *Communications Magazine, IEEE*, 4 (11), 39-45. 2006. [Consultado: Marzo 2010]
- [24] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., "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 Standards*, 2003. Disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>. [Visitada: Marzo 2010]

-
- [25] Terranet. Página web disponible en: <http://www.terranet.se/>. [Visitada: Abril 2010].
- [26] R. Bruno, M. Conti y E. Gregori, "Mesh Networks: Commodity Multihop Ad-Hoc Networks," *IEEE Communications Magazine*, Marzo 2005. [Consultado: Abril 2010].
- [27] Cisco, "Understanding Delay in Packet Voice Networks". Cisco. 2006. Documento PDF disponible en: <http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/delay-details.pdf> [Visitada: Marzo 2010].
- [28] Newport Networks. "VoIP Bandwidth Calculation". Newport Networks. 2005 Documento PDF disponible en: http://www.cyneric.com/documentation/pdf/VoIP_Bandwidth_Calculation.pdf [Consultado: Mayo 2010].
- [29] S. Andersen. "Internet Low Bit Rate Codec (iLBC), RFC 3951." *Global IP Sound*. 2004 Disponible en: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3951.txt> [Visitada: Marzo, 2010]
- [30] R. de Salazar. "Sistema de voz sobre IP para redes inalámbricas en zonas aisladas". *Departamento de Ingeniería y Sistemas Telemáticos de la Universidad Politécnica de Madrid*, Mayo de 2005. [Consultado: Abril 2010].
- [31] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley y E. Schooler. "SIP: Session Initiation Protocol, RFC 3261". 2002 Disponible en: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt> [Visitada: Marzo, 2010].
- [32] M. Handley, V. Jacobson. "SDP: Session Description Protocol, RFC 2327," 2000 Disponible en: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2327.txt> [Visitada: Marzo, 2010].
- [33] H. Schulzrinne, R. Frederick, V. Jacobson. "RTP: Protocol for Real Time Applications, RFC 3550," 2003. Disponible en: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt> [Visitada: Marzo 2010].
- [34] W. Barfield y T.A. Dingus, "Human Factors in Intelligent Transportation Systems". *Lawrence Erlbaum Associates*, United Kingdom, 1998. [Consultado: Marzo 2010].
- [35] M. Peden, R. Scurfield, D. Sleet, D. Mohan, A. Hyder, E. Jarawan, y C. Mathers, "World Report on Road Traffic Injury Prevention". *World Health Organization*, Switzerland, 2004. [Consultado: Mayo 2010].
- [36] Supermotor "ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte," *Instituto de Investigación Sobre Reparación de Vehículos*, 2010. Revista electrónica disponible en: <http://www.supermotor.com/revista/seguridad-vial/274517/sistemas-inteligentes-transporte-traffic-informacion-tecnologias.html> [Visitada: Mayo 2010].
- [37] Research and Innovative Technology Administration (RITA). 2009 Disponible en: <http://www.its.dot.gov/index.htm>. [Visitada: Febrero, 2010].
- [38] S. Biswas, R. Tatchikou, y F. Dion, "Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety", *IEEE Communications Magazine*, 44(1):74 - 82, Enero, 2006. [Consultado: Abril 2010].

-
- [39] M.S. Grewal, L.R. Weill, y A.P. Andrews, "Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration", *Wiley*, USA, Segunda edición, 2007. [Consultado: Abril 2010]
- [40] M. Weigle y S. Olariu, "Handbook on Vehicular Networks", *Taylor and Francis*, United Kingdom, Octubre, 2008. [Consultado: Abril 2010].
- [41] C. Simonds, "Software for the Next-Generation Automobile", *IT Professional*, Diciembre, 2003. [Consultado: Abril 2010].
- [42] California Partners for Advanced Transit and Highways, PATH. Disponible en: <http://www.path.berkeley.edu/>. [Visitada: Abril, 2010]
- [43] Institute of Electric and Electronic Engineers, "IEEE 802.11p, draft" *IEEE Standards*. Junio, 2010. Disponible en: <http://standards.ieee.org/>. [Visitada: Junio, 2010].
- [44] Institute of Electrical and Electronic Engineers, "IEEE Std 1609.4, Trial-use standard for WAVE - Multi-channel Operation", *IEEE Vehicular Technology Society*, Noviembre 2006 [Consultado: Mayo 2010].
- [45] J. Silva. "Principales Estándares 802.11." 2006. Disponible en: <http://ieeestandards.galeon.com> [Visitada: Mayo, 2010].
- [46] K. Bilstrup, "A Survey Regarding Wireless Communication Standards Intended for a High-Speed Vehicle Environment," *Technical Report IDE 0712*, Halmstad University, Sweden, Febrero. 2007. [Consultado: Mayo 2010].
- [47] Institute of Electrical and Electronic Engineers, "IEEE 1609.1, Trial-use standard for wireless accesses in vehicular environments (WAVE) – resource manager," *IEEE Vehicular Technology Society*, Octubre 2006. [Consultado: Mayo 2010].
- [48] Institute of Electrical and Electronic Engineers "IEEE 1609.2, Trial-use standard for wireless accesses in vehicular environments (WAVE) – security services for applications and management messages," *IEEE Vehicular Technology Society*, Octubre 2006. [Consultado: Mayo 2010].
- [49] Institute of Electrical and Electronic Engineers, "IEEE Std 1609.3, Trial-use standard for WAVE – Networking Services," *IEEE Vehicular Technology Society*, April 2007. [Consultado: Mayo 2010].
- [50] M. Hamid, F. Fethi, E. Maximiliano y L. Hitachi. "A survey and qualitative analysis of MAC protocols for vehicular ad hoc networks". *Wireless Communications, IEEE*. 2006. [Consultado: Mayo 2010].
- [51] Institute of Electrical and Electronic Engineers "IEEE 802.11p/D3.0: Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part

11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications”, *IEEE Standards Activities Department*, Julio 2007. [Consultado: Abril 2010].

[52] E. Ferro y F. Potorti. “Bluetooth and Wi-fi wireless protocols: a survey and a comparison,” *Wireless Communications*, IEEE, Febrero 2005. [Consultado: Mayo 2010].

[53] Institute of Electrical and Electronic Engineers.” IEEE-SA Standards Boards, editor. IEEE 1609/802.11p - Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE),” *IEEE Computer Society*, 2007. [Consultado: Mayo 2010].

[54] T.S. Ho y K.C. Chen. “Performance analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA medium access control protocol. volumen 2,” Octubre 1996. [Consultado: Mayo 2010].

[55] R. Koodli, “Fast Handovers for Mobile IPv6, RFC 4068”, Julio 2005. [Consultado: Junio 2010].

[56] “Colombia: Atrasada en Sistemas Inteligentes de Transporte.” *Agencia de Noticias UN*, Universidad Nacional. Medellín. Septiembre 16 de 2010. Revista en línea disponible en: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co> [Visitado: Noviembre 2010]

[57] Oficina Asesora de Planeación - Ministerio de Transporte. “Transporte en cifras versión 2010: documento estadístico del sector transporte” 2010. Documento PDF: disponible en <http://www.mintransporte.gov.co> [Visitado: Diciembre 2010]

[58] Ministerio de Comunicaciones, “Resolución Número 000689”, 2004. Documento PDF disponible en: <http://www.mincomunicaciones.gov.co> [Visitado: Septiembre 2010]

[59] P. Savola, B. Haberman, “Embedding the Rendezvous Point (RP) Address in an IPv6 Multicast Address, RFC 3956,” IETF. 2004), Disponible en: <http://tools.ietf.org/html/rfc3956>. [Consultado: Mayo 2010].

[60] L.R. Ivan y C. M. Ismael. “Rendimiento de Vanets en Escenarios de uso realista,” *Telefónica Investigación y Desarrollo*. España 2007. [Consultado: Mayo 2010].

[61] B. Katrin y otros. “On the Ability of the 802.11p MAC Method and STDMA to Support Real-Time Vehicle-to-Vehicle Communication, “. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Suecia Diciembre 2008. [Consultado: Junio 2010].

[62] International Telecommunication Union, “End-user multimedia QoS categories ITU-T Recommendation G.1010,” *ITU-T*, Noviembre 2001. Documento PDF disponible en: <http://www.catr.cn/radar/itut/> [Consultado: Julio 2010].

[63] N. José y Otros. “Entornos inteligentes basados en redes inalámbricas: aplicaciones al transporte, automóvil inteligente/conectado y seguridad vial”. *Universidad politécnica de Madrid*. Madrid 2009. [Consultado: Junio 2010].

[64] Vehicle Safety Communications Consortium, "Vehicle Safety Communications Project Task 3 - Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications enabled by DSRC", Vehicle Safety Communications Consortium. Marzo 2005. [Consultado: Julio 2010].

[65] S. R. Miguel y S. G. Javier. "Técnicas de transmisión contextual y adaptativa para sistemas de comunicaciones móviles vehiculares". *Universidad Miguel Hernández*. España, 2009. [Consultado: Julio 2010].

[66] Ministerio de Transporte de Colombia "Resolución No. 001384 de 2010" *Ministerio de Transporte*. Abril 2010. Documento PDF disponible en: http://web.mintransporte.gov.co/servicios/normas/archivo/Resolucion_001384_2010.pdf [Visitada: Diciembre, 2010].

[67] R. E. Guido. "Manual de capacidad y niveles de servicio". *Universidad del Cauca Popayán* 1996. [Consultado: Junio 2010].

[68] International Telecommunication Union, "Definición de la carga útil de ruido de confort para utilización según la Recomendación UIT-T G.711 en los sistemas de comunicaciones multimedios por paquetes", *ITU-T*, 2000. Documento PDF disponible en: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711/es> [Visitado: Diciembre, 2010].

[69] C. Brunner, A. Garavaglia, M. Mittal, M. Narang, y J. Vargas, "Inter-System Handover Parameter Optimization". *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall '06)*. Montreal, Canada, Septiembre 2006. [Consultado: Agosto 2010].

[70] R. Theodore. "Wireless Communications, Principles and Practice" *Prentice Hall*, segunda edición, 2002 [Consultado: Septiembre 2010].

[71] "Algoritmos de Compresión de Video Teoría y Estándares," 2010. Página Web disponible en: www.profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo330/2s05/projects/Perez/Algoritmos.htm [Visitada: Diciembre, 2010].

[72] Noticias 3D, "¿Qué cantidad de FPS percibe el ojo humano?". 2006. Página Web disponible en: <http://www.noticias3d.com/noticia.asp?idnoticia=15215>. [Visitada: Diciembre, 2010]

[73] Wikipedia, "Historia de la Televisión", 2010. Página Web disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_televisión [Visitada: Diciembre, 2010]