

**IMPACTO DE LA TÉCNICA DE ACCESO EN EL DESEMPEÑO DE LAS REDES
VEHICULARES VANET**



**Marly Rossana Valverde Vidal
Juan Sebastian Ortega López**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, Septiembre de 2014**

IMPACTO DE LA TÉCNICA DE ACCESO EN EL DESEMPEÑO DE LAS REDES VEHICULARES VANET



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

**Marly Rossana Valverde Vidal
Juan Sebastian Ortega López**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, Septiembre de 2014**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. BASE TEÓRICA	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. COMPONENTES Y TIPOS DE COMUNICACIÓN DE LA RED.....	3
1.2.1. Componentes	4
1.2.2. Dominios	4
1.2.3. Tipos de Comunicación	5
1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA RED VEHICULAR	6
1.4. ENFOQUES DE LOS ITS	7
1.4.1. Enfoque ITS basado en IEEE	7
1.4.2. Enfoque ITS por la ETSI.....	9
1.5. BANDAS DE FRECUENCIA	11
1.6. REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS.....	12
1.6.1. Requerimientos	12
1.6.2. Desafíos	12
1.7. APLICACIONES	13
1.7.1. Aplicaciones de seguridad.....	13
1.7.2. Aplicaciones Comerciales.....	13
1.7.3. Aplicaciones de Apoyo	13
1.7.4. Aplicaciones de gestión del tráfico.....	14
CAPÍTULO 2. TÉCNICAS DE ACCESO EN REDES VANET	17
2.1. INTRODUCCIÓN	17
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	17
2.2.1. Conceptos asociados a la técnica de acceso.	17
2.2.2. Conceptos asociados a la red.....	18
2.3. TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO EN UNA VANET	18
2.3.1. Con Contención.....	19
2.3.2. Libres de contención	25
2.3.3. Híbridas.....	28
2.4. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO	36
2.4.1. Parámetros asociados a la red.	36
2.4.2. Parámetros asociados a la técnica de acceso.	37
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS CSMA/CA Y ALOHA PURO.....	39
3.1. INTRODUCCIÓN	39
3.1.1. Base teórica.	39
3.2. ALOHA PURO.....	41
3.2.1. Mecanismos Internos de ALOHA PURO	41
3.2.2. Funcionamiento.....	42
3.2.3. Probabilidad de enlace correcto	45

3.2.4.	Ventajas y desventajas de ALOHA PURO en una red VANET	46
3.3.	CSMA/CA.....	46
3.3.1.	Mecanismos Internos de CSMA/CA.....	47
3.3.2.	Funcionamiento	49
3.3.3.	CSMA/CA bajo EDCA en VANET	51
3.3.4.	Probabilidad de enlace correcto.....	53
3.3.5.	Ventajas y Desventajas de CSMA/CA en una red VANET	54
3.4.	CSMA/CA Y ALOHA PURO	54
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		57
4.1.	INTRODUCCIÓN	57
4.2.	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	57
4.3.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	59
4.3.1.	Definición de los Escenarios y Casos de Simulación	59
4.3.2.	Definición de las características de los escenarios de simulación.....	60
4.3.3.	Ejecución de las simulaciones	61
4.3.4.	Análisis de resultados.....	62
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.		83
5.1.	CONCLUSIONES.....	83
5.1.1.	Respecto a las Técnicas de Acceso	83
5.1.2.	Respecto al Desarrollo de la Simulación y a la Herramienta de Simulación	83
5.1.3.	Respecto a los Resultados de Simulación	84
5.2.	RECOMENDACIONES	84
5.3.	TRABAJOS FUTUROS	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes y Dominios de una red vehicular	4
Figura 2. Tipos de comunicación en una red VANET	5
Figura 3. Pila de Protocolos WAVE	8
Figura 4. Esquema de Arquitectura general ETSI TC ITS	9
Figura 5. Capa de Red y Transporte de la ETSI TC ITS	10
Figura 6. Capa de Tecnologías de Acceso por la ETSI	10
Figura 7. Distribución de Canales y ancho de banda en DSRC	11
Figura 8. Clasificación de las técnicas de acceso en redes VANET	19
Figura 9. Parámetros de la técnica de acceso en el desempeño de VANET	36
Figura 10. Estructura general de trama en una red VANET	40
Figura 11. Cabecera MAC en IEEE 802.11p	40
Figura 12. Tormenta <i>broadcast</i>	42
Figura 13. Diagrama de flujo ALOHA PURO, transmisión <i>unicast</i>	43
Figura 14. Ejemplo de colisión de ALOHA PURO	43
Figura 15. Periodo Vulnerable en ALOHA PURO	44

Figura 16. Diagrama de flujo ALOHA PURO, transmisión <i>broadcast</i> .	44
Figura 17. ALOHA PURO en una red VANET.	45
Figura 18. Incremento en la ventana de contención.	48
Figura 19. Transmisión, canal libre, CSMA/CA.	49
Figura 20. Transmisión, canal ocupado, CSMA/CA.	49
Figura 21. Diagrama de flujo CSMA/CA, transmisión <i>broadcast</i> .	50
Figura 22. CSMA/CA en VANET. Diagrama en el tiempo de una transmisión <i>broadcast</i> .	51
Figura 23. Esquema de EDCA en IEEE 802.11p.	52
Figura 24. Ejemplo de CSMA/CA, bajo el concepto de EDCA en VANET.	53
Figura 25. Área de simulación seleccionada.	60
Figura 26. Área de simulación adaptada en SUMO.	60
Figura 27. BER en el tiempo, escenario 1, tasa de 6 Mbps.	62
Figura 28. BER en el tiempo, escenario 1, tasa de 18 Mbps.	63
Figura 29. Latencia promedio, escenario 1.	64
Figura 30. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 1, tasa de 6 Mbps.	65
Figura 31. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 1, tasa de 18 Mbps.	65
Figura 32. Tasa promedio de paquetes perdidos, escenario 1.	66
Figura 33. <i>Throughput</i> instantáneo, escenario 1, tasa de 6 Mbps.	67
Figura 34. <i>Throughput</i> instantáneo, escenario 1, tasa de 18 Mbps.	67
Figura 35. BER en el tiempo, escenario 2, tasa de 6 Mbps.	68
Figura 36. BER en el tiempo, escenario 2, tasa de 18 Mbps.	68
Figura 37. Latencia promedio, escenario 2.	69
Figura 38. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 2, tasa de 6 Mbps.	70
Figura 39. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 2, tasa de 18 Mbps.	70
Figura 40. Tasa promedio de paquetes perdidos, escenario 2.	71
Figura 41. <i>Throughput</i> instantáneo, escenario 2, tasa de 6 Mbps.	72
Figura 42. <i>Throughput</i> instantáneo, escenario 2, tasa de 18 Mbps.	72
Figura 43. BER en el tiempo, escenario 3, tasa de 6 Mbps.	73
Figura 44. BER en el tiempo, escenario 3, tasa de 18 Mbps.	73
Figura 45. Latencia promedio, escenario 3.	74
Figura 46. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 3, tasa de 6 Mbps.	75
Figura 47. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 3, tasa de 18 Mbps.	75
Figura 48. Tasa promedio de paquetes perdidos, escenario 3.	76
Figura 49. <i>Throughput</i> instantáneo, escenario 3, tasa de 6 Mbps.	77
Figura 50. <i>Throughput</i> instantáneo, escenario 3, tasa de 18 Mbps.	77
Figura 51. Valores máximos de <i>throughput</i> para 6 Mbps y 18 Mbps.	78
Figura 52. Valores máximos de BER para 6 Mbps y 18 Mbps.	78
Figura 53. Valores máximos de Latencia para 6 Mbps y 18 Mbps.	79
Figura 54. Valores mínimos de probabilidad de enlace correcto para 6 Mbps y 18 Mbps.	79
Figura 55. Valores máximos para la tasa de paquetes perdidos para 6 Mbps y 18 Mbps.	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de Comunicación en una red VANET.	6
Tabla 2. Bandas de Frecuencia en VANET.....	11
Tabla 3. Síntesis de las aplicaciones en redes VANET.....	14
Tabla 4. Técnicas de acceso con contención.....	24
Tabla 5. Técnicas de acceso libres de contención.. ..	27
Tabla 6. Técnicas de acceso híbridas.	33
Tabla 7. Resumen de las características de las Técnicas de Acceso para VANET.	35
Tabla 8. Tipos de tráfico por EDCA en IEEE 802.11p.	52
Tabla 9. Comparación de CSMA/CA y ALOHA PURO en VANET.. ..	55
Tabla 10. Simuladores de tráfico.....	57
Tabla 11. Simuladores de red.	58
Tabla 12. Simuladores Híbridos.	58
Tabla 13. Escenarios y casos de simulación.....	59
Tabla 14. Datos de simulación.	59
Tabla 15. Parámetros de los Escenarios.....	61
Tabla 16. Resumen del desempeño en una comunicación de datos en una VANET con las técnicas de acceso CSMA/CA y ALOHA PURO.. ..	81

LISTA DE ACRÓNIMOS

A-ADHOC MAC	<i>Adaptive AD-HOC Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio AD-HOC Adaptativo.
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i> , Asociación de Industrias de Radio y Negocios.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> , Sociedad Americana de Pruebas y Materiales.
AU	<i>Application Unit</i> , Unidad de Aplicación.
BTMA	<i>Busy Tone Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Tono Ocupado.
BTP	<i>Basic Transport Protocol</i> , Protocolo Básico de Transporte.
CAM	<i>Cooperative Awareness Message</i> , Mensajes de Advertencia Cooperativa.
CATA	<i>Collision Avoidance Time Allocation</i> , Asignación de Tiempo por Evasión de Colisiones.
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i> , Mecanismo de Apreciación Clara del Canal.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CEN	<i>European Committee for Standardization</i> , Comité de Estandarización Europeo.
CSAP	<i>Concurrent Slot Assignment Protocol</i> , Protocolo Concurrente de Asignación de Slots.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones.
DBTMA	<i>Dual Busy Tone Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Doble Tono de Ocupado.
DCAP	<i>Decentral Channel Access Protocol</i> , Protocolo de Acceso de Canal Descentralizado.
DCA-PC	<i>Dynamic Channel Assignment with Power Control</i> , Asignación Dinámica de canal con Control de Potencia.
DCC	<i>Decentralized Congestion Control</i> , Control de Congestión Descentralizado.
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> , Función de Coordinación Distribuida.
DENM	<i>Decentralized Environmental Notification Message</i> , Mensajes de Notificación de Entorno Descentralizado.
D-MAC	<i>Directional Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio Direccional.
DMMAC	<i>Dedicated Multichannel Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio Multicanal Dedicado.
D-PRMA	<i>Distributed Packet Reservation Multiple Access</i> , Acceso Múltiple Distribuido con Reserva de Paquetes.
DPSM	<i>Dynamic Power Saving Mechanism</i> , Mecanismo Dinámico de Ahorro de Potencia.

DSRC	<i>Dedicated Short Range Communications</i> , Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance.
D-TDMA	<i>Dynamic TDMA</i> , TDMA Dinámico.
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i> , Acceso al Canal Distribuido Mejorado.
EDCF	<i>Enhanced Distributed Coordination Function</i> , Función de Coordinación Distribuida Mejorada.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
FAMA	<i>Floor Acquisition Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Umbral de Adquisición.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FPRP	<i>Five Phase Reservation Protocol</i> , Protocolo de Reserva de Cinco Fases.
HRMA	<i>Hop-Reservation Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Reservación de Salto.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo Internet.
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i> , Sistemas de Transporte Inteligente.
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
IVC	<i>Inter Vehicle Communication</i> , Comunicación Entre Vehículos.
MAC	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MACAW	<i>Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless</i> , Acceso Múltiple con Evasión de Colisiones para Inalámbricas.
MAMBA	<i>Medium Access with Memory Bifurcation and Administration</i> , Acceso al Medio con Administración y Bifurcación de Memoria.
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i> , Red Móvil Ad Hoc.
MARCH	<i>Media Access with Reduced Handshake</i> , Acceso al Medio con <i>Handshake</i> Reducido.
MCS	Modelo para la Construcción de Soluciones.
MCTRP	<i>Multi-Channel Token Ring Protocol</i> , Protocolo Token Ring Multicanal.
MID	Modelo para la Investigación Documental.
M-MAC	<i>Mobility-Adaptive Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio con Movilidad Adaptativa.
MMAC	<i>Multi-channel Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio Multicanal.

MS ALOHA	<i>Mobile Slotted ALOHA, ALOHA Ranurado Móvil.</i>
OBU	<i>On Board Unit, Unidad a Bordo.</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.</i>
OSI	<i>Open System Interconnection, Interconexión de Sistemas Abiertos.</i>
PAMAS	<i>Power Aware Medium Access control with Signaling, Control de Acceso al Medio Consciente de Potencia con Señalización.</i>
PCF	<i>Point Coordination Function, Función de Coordinación por Punto.</i>
PCM	<i>Power Control Medium Access Control, Control de Acceso al Medio con Control de Potencia.</i>
PCMA	<i>Power Controlled Multiple Access, Acceso Múltiple Controlado por Potencia.</i>
R-ALOHA	<i>Reservation ALOHA, ALOHA de Reservación.</i>
RBAR	<i>Receiver Based Auto Rate, Receptor Basado en Auto Tasa.</i>
RI-BTMA	<i>Receiver Initiated Busy Tone Medium Access, Receptor Iniciado por Acceso al Medio por Tono Ocupado.</i>
RR-ALOHA	<i>Reliable Reservation ALOHA, ALOHA de Reservación Confiable.</i>
RSU	<i>Road-Side Unit, Unidad en Carretera.</i>
S-ALOHA	<i>Slotted ALOHA, ALOHA Ranurado.</i>
SRMA/PA	<i>Soft Reservation Multiple Access with Priority Assignment, Acceso Múltiple de Reserva Suave con Asignación de Prioridad.</i>
STDMA	<i>Self-Organized Time Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo Auto-Organizado.</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol, Protocolo de Control de Transmisión.</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo.</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol, Protocolo de Datagrama de Usuario.</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid, Vehículo a Red.</i>
V2H	<i>Vehicle to Home, Vehículo a Hogar.</i>
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure, Vehículo a Infraestructura.</i>
V2P	<i>Vehicle to Pedestrian, Vehículo a Peatón.</i>
V2R	<i>Vehicle to Road, Vehículo a Carretera.</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle, Vehículo a Vehículo.</i>
V2X	<i>Vehicle to Vehicle and/or Vehicle to Infrastructure, Vehículo a Vehículo y/o Vehículo a Infraestructura.</i>
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Network, Redes Vehiculares Ad Hoc.</i>
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments, Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares.</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity, Fidelidad Inalámbrica.</i>

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las redes inalámbricas han evolucionado en diversos aspectos con el fin de brindar nuevas posibilidades de comunicación a los usuarios finales. Bajo este lineamiento, un contexto que se ha visto influenciado por dicha evolución es la comunicación entre vehículos; un novedoso enfoque que facilita el acceso a información de cualquier índole directamente en los automóviles.

De lo anterior surge el concepto de Red *Ad hoc* Vehicular (VANET, *Vehicular Ad hoc Network*) como un tipo de red inalámbrica de corto y mediano alcance formada por la conexión entre vehículos (nodos) e infraestructura vial. Las redes VANET han evolucionado gracias a la investigación científica, a los avances en tecnologías inalámbricas y a esfuerzos conjuntos de la industria automotriz. Actualmente tienen el potencial de soportar diversos tipos de servicios como seguridad, acceso a Internet, transmisiones multimedia, entre otros.

Las VANET pueden clasificarse como una especialización de las denominadas Redes Móviles *Ad hoc* (MANET, *Mobile Ad hoc Networks*), dado que estas últimas facilitan la comunicación entre nodos de forma directa o mediante nodos intermedios, como ocurre en las comunicaciones entre vehículos.

En las redes VANET se presentan diferentes desafíos que deben ser resueltos, entre éstos se destaca el procedimiento de acceso al medio por parte de los nodos. En ambientes vehiculares, dicho acceso al medio puede verse significativamente afectado por la densidad de vehículos presentes, sus respectivas velocidades, la variabilidad del canal inalámbrico, etc.; resultando en pérdida de paquetes, intentos fallidos de conexión y disminución del *throughput*.

En relación a dichos parámetros, las redes vehiculares deben presentar enlaces lo suficientemente confiables y con suficiente capacidad para que el acceso al medio no afecte considerablemente las comunicaciones que se realizan. Las VANET deben proveer a sus usuarios comunicaciones confiables, con poca latencia y acceso garantizado al medio.

Para el cumplimiento de dichos requerimientos enfocados en los usuarios, la comunidad científica y académica, junto con los actores del sector automotriz, se han enfocado en modelar ambientes vehiculares mediante la simulación de los mismos. Lo anterior para reducir costos de implementación y obtener resultados significativos en tiempos menores; como resultado se han propuesto diferentes técnicas de acceso para las VANET, con las cuales se espera mejorar el intercambio de información entre los nodos y hacerlo más equitativo.

Este proyecto de grado realiza mediante simulación un análisis del desempeño de una comunicación de datos de una red VANET, cuando ésta opera bajo los lineamientos de una técnica de acceso específica.

Este documento se divide en cinco capítulos, estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introduce los conceptos fundamentales de las redes *ad hoc* vehiculares.

Capítulo 2. Presenta una síntesis de las técnicas de acceso más relevantes e implementadas en redes VANET. También se identifican los parámetros que afectan el desempeño de dichas redes.

Capítulo 3. Describe el funcionamiento de las dos técnicas de acceso seleccionadas para el desarrollo de este proyecto.

Capítulo 4. Describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, incluyendo la herramienta software seleccionada y las características del escenario de simulación; además se describen las simulaciones llevadas a cabo y el análisis de resultados.

Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones del desarrollo del proyecto, se presentan recomendaciones para trabajos e investigaciones en este campo y se proponen trabajos futuros.

CAPÍTULO 1. BASE TEÓRICA

1.1. INTRODUCCIÓN

La integración de las tecnologías de la información y de las comunicaciones con los sistemas de transporte terrestre promete grandes beneficios que permitirán simplificar y mejorar las actividades a la hora de conducir un vehículo. Con el objetivo de lograr dichos beneficios, el sector automotriz ha experimentado avances hacia la conexión entre vehículos, la cual se ha llevado a cabo por medio de investigaciones de diversas comunidades científicas y académicas, que observan en las redes vehiculares el futuro de una nueva forma de transporte.

Actualmente, un conductor experimenta diferentes problemas al momento de desplazarse en su vehículo. Entre estos, los más notorios son: congestión de tráfico, accidentes de tránsito, demora en el tiempo de viaje, alto consumo de combustible, contaminación ambiental y auditiva. La solución a estos problemas se plantea en el proyecto de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, *Intelligent Transportation Systems*) [1], propuesto inicialmente por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, el cual está destinado a atenuar los aspectos negativos del transporte terrestre para toda clase de vehículos motorizados, tanto en las ciudades como en las vías rurales.

Para que la implementación de los ITS sea un hecho, se requiere de herramientas, métodos y elementos que permitan la comunicación entre vehículos. Las Redes Vehiculares *Ad hoc* (VANET, *Vehicular Ad hoc Networks*) surgen como principal soporte para los ITS. Estas redes son una clase especial de las redes móviles *Ad-hoc* (MANET, *Mobile Ad-Hoc Network*) en donde la comunicación se establece entre automóviles. Las VANET se conforman por vehículos (nodos) e infraestructura fija que soporta la comunicación y gestiona funciones de enrutamiento y control. De manera general, se les denomina comunicaciones “V2X” a las distintas formas de comunicación que se presentan en este tipo de redes y se destacan, entre otras, las siguientes: comunicaciones de Vehículo a Vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*), de Vehículo a Infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure*) y de Infraestructura a Vehículo (I2V, *Infrastructure to Vehicle*).

En una red VANET se lleva a cabo una constante comunicación mediante el intercambio de información entre los diferentes dispositivos de red, capaces de difundir y recoger datos de los vehículos, de la carretera y de las condiciones ambientales. Esta información tiene como fin el procesamiento y análisis por parte de los nodos para advertir a los usuarios de posibles peligros, aumentando así la seguridad y la eficiencia vial.

Las redes VANET, al ser un tipo de red inalámbrica, son sometidas a diversos factores que afectan su forma de operar y su desempeño. Por lo tanto, en este capítulo se presenta un análisis y una descripción de las generalidades de este tipo de redes.

1.2. COMPONENTES Y TIPOS DE COMUNICACIÓN DE LA RED

Una red vehicular cuenta con gran variedad de componentes para su correcto funcionamiento. A continuación se muestran algunos de ellos [2,3]:

1.2.1. Componentes

Una red VANET es una red *ad hoc* inalámbrica enfocada a entornos vehiculares que tiene por nodos a los automóviles y está conformada por los siguientes elementos:

- **Unidad a Bordo (OBU, *On Board Unit*):** son dispositivos que se ubican en cada nodo y su función es permitir la comunicación entre vehículos y entre vehículos e infraestructura. Esta unidad se encarga de los protocolos de enrutamiento, seguridad y acceso al medio de cada nodo. De esta manera, en el caso de no poder comunicar directamente dos vehículos, es capaz de enviar los paquetes de datos mediante la técnica multi-salto hasta alcanzar el destino.
- **Unidad de Aplicación (AU, *Application Unit*):** son dispositivos equipados dentro del vehículo, los cuales pueden ser portables y tienen como función utilizar las aplicaciones proporcionadas por un proveedor de telecomunicaciones mediante las capacidades de comunicación de la OBU.
- **Unidad al lado de la Carretera (RSU, *Road-Side Unit*):** son dispositivos ubicados a lo largo de la carretera, los cuales operan como nodos estáticos. Su principal función consiste en extender el rango de comunicación de la red permitiendo la comunicación entre dos OBU distantes, facilitando así la transmisión y recepción de paquetes por parte de éstos. También pueden proveer acceso a Internet a los vehículos.
- **Hot Spot (HS):** son nodos estáticos ubicados a lo largo de las vías. Su función es ofrecer acceso a Internet a través de la red inalámbrica y un enrutador conectado a un proveedor de servicios de Internet. Un HS se diferencia de una RSU en que son más simples y su uso va dirigido hacia los usuarios comunes de la red.

Generalmente, un nodo en una red vehicular se conforma de una OBU y varias AU que, conectadas con HS y/o RSU, proporcionan el intercambio de datos para la operación de una VANET.

1.2.2. Dominios

El funcionamiento de una red VANET conforma diversos dominios mediante los componentes descritos anteriormente. La Figura 1 indica los tres dominios [4]:

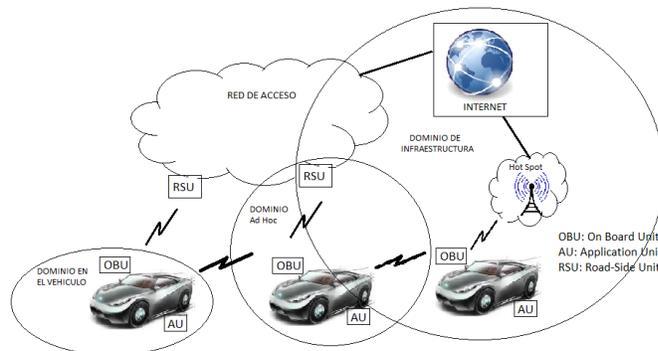


Figura 1. Componentes y Dominios de una red vehicular. Adaptada de [5].

- **Dominio en el Vehículo (*In-Vehicle Domain*):** este dominio está conformado por la red interna del vehículo, la cual se compone de la OBU y una o más AU. Dicha OBU se conecta con las AU para permitir la ejecución una o más aplicaciones dadas por un proveedor de telecomunicaciones, utilizando sus capacidades de comunicación.
- **Dominio *Ad Hoc* (*Ad Hoc Domain*):** este dominio hace referencia a la comunicación inalámbrica entre las OBU o entre los automóviles. También cubre la comunicación entre una OBU y una RSU cuando se necesita ampliación de cobertura. Por otra parte, una OBU se puede comunicar con otra OBU con el fin de aumentar el rango de cobertura de la red mediante la comunicación multi-salto o haciendo uso de OBUs y/o HS distribuidos a lo largo de las carreteras.
- **Dominio de Infraestructura (*Infrastructure Domain*):** este dominio está compuesto por las RSU y los HS que permiten a los vehículos acceder a las diversas aplicaciones que soporta una red VANET. También, estos elementos brindan mayor cobertura a la red al actuar como entidad de reenvío de paquetes al unirse a una infraestructura de red externa. En el caso de que, ni las RSU ni los HS provean acceso a Internet, las OBU pueden apoyarse en la infraestructura de diversas tecnologías inalámbricas actuales con el fin de mantener la conectividad en las aplicaciones soportadas por las redes VANET.

1.2.3. Tipos de Comunicación

La notación para comunicaciones vehiculares tiene la forma general “V2X”, aunque existen en la literatura otros tipos de notación. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*) utiliza la letra “V” de vehículo para referirse a los tipos de comunicación en una VANET; mientras que el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) utiliza en su notación la letra “C” de carro.

La Figura 2 muestra un esquema de los distintos tipos de comunicación utilizados tanto por la ITU como por la ETSI, mientras que la Tabla 1 describe cada uno de los tipos de comunicación en redes vehiculares y las distintas notaciones que les son dadas por la literatura en general.

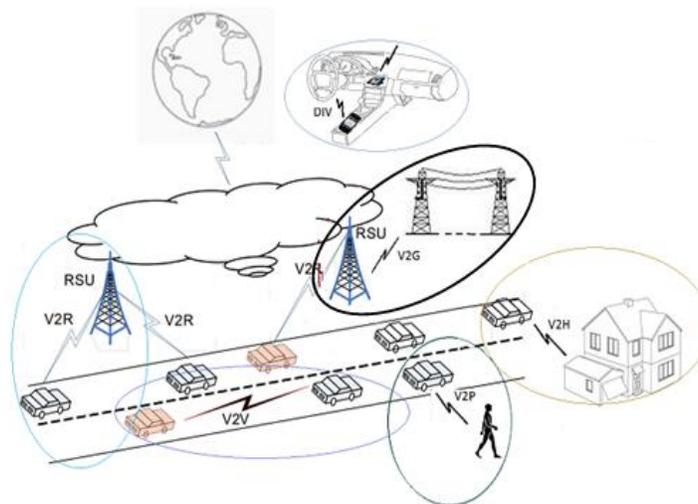


Figura 2. Tipos de comunicación en una red VANET. Adaptada de [6].

TIPO DE COMUNICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Vehículo a Vehículo (V2V, Vehicle to Vehicle) Carro a Carro (C2C, Car to Car) Comunicación entre vehículos (IVC, Inter-Vehicle Communication)	Es la comunicación que se presenta entre las OBU de distintos nodos en una red VANET, ya sea directa o en múltiples saltos. Generalmente, la notación más utilizada es la "V2V".
Vehículo a Infraestructura (V2I, Vehicle to Infrastructure) Vehículo a Carretera (V2R, Vehicle to Roadside)	Es la comunicación que se da entre los vehículos y la infraestructura a lo largo de la carretera, específicamente entre las OBU y la infraestructura.
Vehículo a Peatón (V2P, Vehicle to Pedestrian)	Es la comunicación entre los nodos de una red vehicular y los peatones que transitan por las calles. Este tipo de comunicación presenta desafíos adicionales, dado que el movimiento de las personas por los andenes es más aleatorio que el de los autos por las vías.
Directo dentro del Vehículo (DIV, Direct In Vehicle)	Representa la comunicación entre dos o más AU en el mismo vehículo con el fin de intercambiar información.
Vehículo a Hogar (V2H, Vehicle to Home)	Representa la comunicación que se da entre un nodo de una red fija en el hogar y un nodo de una red vehicular, mediante redes de nueva generación (NGN, <i>Next Generation Networks</i>).
Vehículo a Red Eléctrica (V2G, Vehicle to Grid)	Representa la comunicación que se da entre un nodo de una red vehicular y una red de energía eléctrica (<i>utility grids</i>) por medio de adaptadores Ethernet (PoE, <i>Power over Ethernet</i>) y Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC, <i>Dedicated Short Range Communications</i>).

Tabla 1. Tipos de Comunicación en una red VANET. Adaptada de [7].

1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA RED VEHICULAR [8]

Una red vehicular se diferencia de otras redes por las siguientes características

- **Topología de red variable:** las VANET presentan una topología con constantes cambios, de la cual no es posible realizar una descripción precisa y fija. En este caso, dicha variabilidad se da por las características inherentes del tráfico como el constante movimiento, cambios de velocidad y posibilidad de movimientos impredecibles de los vehículos.
- **Autonomía:** es la libertad que tiene cada nodo de la red para acceder al medio, transmitir, enrutar y recibir paquetes cuando lo requiera; esto sin estar bajo la influencia de un control centralizado. Por esto, las OBU y las RSU manejan dichas tareas de manera independiente.

- **Canal Vulnerable:** dada la naturaleza inalámbrica y *ad hoc* de la red, la información puede verse sujeta a desvanecimientos o interferencias más frecuentemente que otras redes inalámbricas. Lo anterior debido a las áreas y sectores por donde circulan los vehículos y los potenciales objetos que pueden afectar la comunicación (árboles, edificios, construcciones, entre otros).
- **Movilidad predecible:** es la limitación en movimiento que experimenta un nodo de una VANET al desplazarse únicamente a lo largo y ancho de las vías; esto hace que, con estudios adecuados, pueda llegar a generalizarse un patrón de movimiento determinado para un área específica.
- **Potencia ilimitada:** no hay restricción en los nodos VANET en el consumo de energía, dado que la batería de los vehículos proporciona la cantidad suficiente para su funcionamiento. Los problemas frecuentes de energía en nodos móviles no son relevantes en redes vehiculares.
- **Alta capacidad computacional:** es la capacidad que tienen los dispositivos de una red VANET para procesar diversos tipos de información de manera eficiente, evitando retardos considerables, especialmente cuando de aplicaciones de seguridad se trata.

1.4. ENFOQUES DE LOS ITS [5,7,6]

El funcionamiento de una red vehicular está ligado directamente a tecnologías, protocolos, estándares y modelos de arquitectura que son utilizados para procesar la información y satisfacer las demandas de calidad que generan los usuarios de dichas redes. Estos elementos se ven sujetos a cambios y a diferentes modos de ser utilizados. Un ejemplo de esta variabilidad es la banda de frecuencias en la que operan, la cual depende del país y organismo de estandarización que se trate.

A nivel mundial, algunos de los enfoques ITS más importantes en materia de desarrollo e implementación de redes vehiculares son el enfoque norteamericano y el enfoque europeo: los cuales comparten ciertas similitudes, pero que a su vez poseen características singulares.

1.4.1. Enfoque ITS basado en IEEE

Estados Unidos fue uno de los pioneros en los ITS, en donde se han obtenido avances significativos en este campo, como la puesta en marcha de proyectos pilotos. El enfoque norteamericano tiene como base fundamental el conjunto de protocolos denominado por la IEEE como Acceso Inalámbrico para Entornos Vehiculares (*WAVE, Wireless Access In Vehicular Environments*) y la tecnología DSRC, tratada más adelante en la Sección 1.5.

1.4.1.1. Modelo de *stack* de protocolos IEEE WAVE

Este conjunto de protocolos toma como base el estándar desarrollado por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (*ASTM, American Society for Testing and Materials*). En WAVE se especifican *todas* las capas de un modelo de red VANET utilizando el estándar IEEE 802.11p para la capa física y MAC; además se utiliza la familia de protocolos IEEE 1609 para el resto de capas. La Figura 3 muestra una representación gráfica de este modelo.

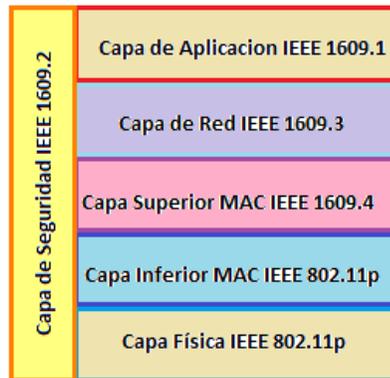


Figura 3. Pila de Protocolos WAVE. Adaptado de [3].

➤ Capa física y Capa inferior MAC

El estándar IEEE 802.11p especifica las características de la capa física y de la capa de acceso. Para la capa física se usa Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), mientras que para la capa de acceso se utiliza Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*), con Esquema de Acceso al Canal Mejorado (EDCA, *Enhanced Distributed Channel Access*).

➤ Capa superior MAC

El estándar IEEE 1609.4 en la capa de acceso se encarga de la operación multicanal que debe implementar el estándar IEEE 802.11p, la cual consiste en que cada OBU debe conmutar entre un canal de servicio y el canal de control cada 50 ms para acceder al medio.

➤ Capa de Red

El estándar IEEE 1609.3 se encarga de las capas de red y transporte, específicamente de los servicios de gestión de direcciones y de enrutamiento.

➤ Capa de seguridad

El estándar IEEE 1609.2 se encarga de la seguridad de las comunicaciones V2X de la red. Esto es, la encriptación de mensajes, la autenticación de nodos, entre otras tareas de seguridad.

➤ Capa de Aplicación

El estándar IEEE 1609.1 en la capa de aplicaciones describe al administrador de recursos de aplicaciones WAVE. Se encarga de los servicios y de las interfaces de las capas superiores de sesión y presentación de acuerdo con el modelo de referencia OSI. También describe el formato de almacenamiento de datos que se utiliza por las aplicaciones para acceder a otras arquitecturas.

1.4.2. Enfoque ITS por la ETSI

En Europa se desarrolló un enfoque propio ITS, el cual posee ciertas similitudes y diferencias en comparación con el norteamericano; las diferencias se aprecian en la capa MAC en la utilización de protocolos propios europeos como el control de congestión descentralizado (DCC, *Decentralized Congestion Control*), desarrollado en conjunto por varias entidades entre las cuales se resaltan el proyecto investigativo COMeSafety, el Comité de Estandarización Europeo (CEN, *European Committee for Standardization*), además de todos los grupos de trabajo de la ETSI TC ITS (WG, *Working Groups*), cada uno con un énfasis en cada aspecto de la arquitectura de red.

1.4.2.1. Modelo de Arquitectura ETSI TC ITS

La Figura 4, presenta la arquitectura de comunicación ITS por la ETSI, como una base para futuros desarrollos y estándares.



Figura 4. Esquema de Arquitectura general ETSI TC ITS. Adaptada de [2].

➤ Capa ITS Seguridad

De la capa ITS Seguridad se encarga el grupo de trabajo WG-5. En esta se describe todo lo relacionado con seguridad y protección de la privacidad de las aplicaciones ITS. En otras palabras, su principal objetivo es velar por la autenticidad, confidencialidad, autoridad e integridad de la información ante posibles ataques.

➤ Capa ITS Gestión

La capa ITS de Gestión es una capa común a las demás capas ITS y se encarga del intercambio de información entre todas las capas del modelo de arquitectura ETSI TC ITS. Lo anterior con el fin de generar una integración operacional entre los múltiples protocolos y tecnologías que operan en una red vehicular. Entre las principales funciones que se implementan en esta capa se incluyen: la selección dinámica de la tecnología de acceso para una determinada aplicación, el seguimiento de los parámetros de las interfaces de comunicación, la gestión de servicios, permisos y prioridades de transmisión y la implementación de mecanismos de control de congestión.

➤ Capa ITS Aplicaciones

El enfoque europeo es más específico que el norteamericano en cuanto a la categorización de aplicaciones y describe un conjunto básico de éstas definido por la ETSI en la recomendación TR 102 638, donde se encuentran:

1. Seguridad vial activa.
2. Eficiencia de tráfico cooperativa.
3. Servicios locales cooperativos.
4. Servicios de Internet globales.

➤ Capa ITS Facilidades

La capa ITS Facilidades va estrechamente ligada con ITS Aplicaciones, dado que le provee toda la información de apoyo, de comunicación y de otras aplicaciones; encargándose del mantenimiento y de la continua actualización de toda la información del ambiente de la red vehicular, incluyendo los servicios de mensajes de advertencia cooperativa (CAM, *Cooperative Awareness Message*) y de mensajes de notificación de entorno descentralizado (DENM, *Decentralized Environmental Notification Message*).

➤ Capa ITS Red y Transporte

La capa ITS de Red y Transporte se subdivide en las capas de red y transporte, como lo muestra la Figura 5. Aquí se define el protocolo básico de transporte (BTP, *Basic Transport Protocol*), diseñado por la ETSI para tráfico con bajo sobre encabezamiento. Se observa que hay soporte a Internet a través de TCP/UDP o IPv6. Por último se define el concepto de “*Geonetworking*”, que consiste en un conjunto de protocolos que describen la forma en la que se llevan a cabo las transmisiones de paquetes entre los nodos de la red.

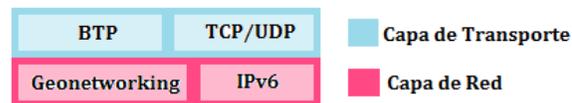


Figura 5. Capa de Red y Transporte de la ETSI TC ITS. Adaptada de [3].

➤ Capa ITS Tecnologías de Acceso

La capa ITS Tecnologías de Acceso se subdivide entre la capa física y MAC, como se muestra en la Figura 6. Ambas capas son muy similares con las homologas del *stack* de protocolos norteamericano WAVE, tratado anteriormente en la Sección 1.4.1.1, con la salvedad de que en MAC no se utiliza el protocolo IEEE 1609.4. En lugar de éste se implementa el mecanismo DCC.

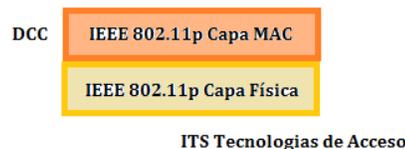


Figura 6. Capa de Tecnologías de Acceso por la ETSI. Adaptada de [2].

1.5. BANDAS DE FRECUENCIA [9]

A nivel mundial, ha sido necesario asignar una banda de frecuencia para todo el proceso de soporte de las redes VANET dentro del marco de los ITS. Por esto, se ha establecido entre todos los organismos de estandarización que la banda de 5.9 GHz quede asignada para las comunicaciones de redes vehiculares, con pequeñas variaciones dependiendo de la zona geográfica. Es así como en Japón, la Asociación de Industrias de Radio y Negocios (ARIB, *Association of Radio Industries and Businesses*) mediante el estándar STD-T75 y en Europa el CEN, han determinado anchos de banda específicos y canales de frecuencia de manera singular para su uso en redes *ad hoc* vehiculares.

Para la banda de frecuencias de 5.9 GHz, se ha concebido la tecnología DSRC como la más apropiada para trabajar en ambientes de redes vehiculares. DSRC es una tecnología radio que proporciona comunicaciones inalámbricas de corto y mediano alcance en ambientes de alta movilidad. En el caso particular de los Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones asignó un ancho de banda de 75 MHz con el fin de dar soporte a los ITS a nivel físico. Dicho ancho de banda recae entre 5.850 GHz y 5.925 GHz para comunicaciones V2V, I2V y V2I y está dividida en 7 canales no traslapados, cada uno de 10 MHz, como se muestra en la Figura 7.

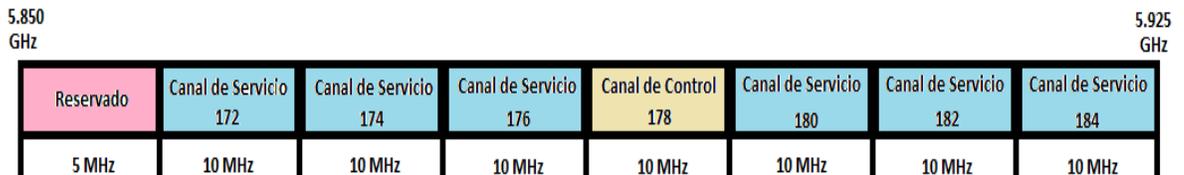


Figura 7. Distribución de Canales y ancho de banda en DSRC. Por los Autores.

Otra tecnología radio considerada relevante en el ámbito de las comunicaciones vehiculares es la adoptada por Japón y denominada por la ARIB como el estándar T-75 (*STD-T75, Standard-T75*). Dicha tecnología toma como base a DSRC, pero presenta diferencias en ciertos aspectos como en la implementación de los métodos de modulación QPSK y ASK, las tasas de transmisión de 1 y 4 Mbps, entre otros. Una de las características más relevantes es que esta tecnología japonesa opera en la banda de 5.8 GHz, con un ancho de banda dedicado de 4.4 MHz para cada uno de sus 14 canales.

En la Tabla 2 se presentan las zonas a nivel mundial pioneras en el tema que ya han acogido en su espectro radioeléctrico las bandas para comunicaciones vehiculares.

Tecnología	Organismo de estandarización	Zona	Frecuencias (GHz)
DSRC	FCC	EEUU	5.850 – 5.925
	CEN	Europa	5.855 – 5.925
STD- T75	ARIB	Japón	5.770 – 5.850

Tabla 2. Bandas de Frecuencia en VANET. Adaptada de [3].

1.6. REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS [10]

Debido a las características de las redes VANET descritas anteriormente, deben considerarse requerimientos y desafíos adicionales que otras redes inalámbricas no presentan. Una síntesis de éstos se muestra a continuación:

1.6.1. Requerimientos

Una red vehicular debe cumplir con ciertas características que le permitan operar de manera eficiente en cuanto a rendimiento, flexibilidad y disponibilidad. Por esto, a continuación se exponen los principales requerimientos de las redes VANET.

- **Estabilidad en el enlace inalámbrico:** en una red vehicular se requiere de estabilidad, tanto en los enlaces entre nodos como entre nodos e infraestructura; de manera que la red proporcione el *throughput* adecuado, baja latencia y disminuya las pérdidas de datos, en especial para aplicaciones de seguridad.
- **Capacidad de recuperación en enlaces:** es la habilidad de recuperación y restablecimiento de la comunicación ante situaciones como la ausencia de un control central o, ante pérdidas por supresión de nodos presentes en la red y deterioro en la calidad del enlace.
- **Eficiencia del espectro:** a causa del continuo cambio en los nodos presentes en una red VANET, las OBU deben manejar eficientemente el espectro electromagnético con ayuda de técnicas de modulación y codificación. Esto con el fin de evitar problemas de acceso a la red y pérdidas en la señal.
- **Calidad de servicio:** teniendo en cuenta las distintas aplicaciones que soportan las redes vehiculares, se requiere de un control continuo en términos de calidad de servicio para garantizar una asignación de prioridad adecuada a los paquetes, dependiendo de la aplicación que los origine.
- **Escalabilidad:** es la capacidad de la red de manejar adecuadamente un incremento en el número de usuarios sin que el funcionamiento, desempeño y complejidad de manejo de la red se vean afectados significativamente.
- **Mecanismos de seguridad de los datos:** dada la importancia de la información transmitida por los vehículos, en una red vehicular se hace necesaria la implementación de procesos que permitan la autenticación y encriptación de los datos para disminuir vulnerabilidades de seguridad en la información.

1.6.2. Desafíos

A diferencia de los requerimientos descritos anteriormente, para que una red VANET opere de manera óptima existen retos que deben afrontar para mejorar en su funcionamiento, seguridad, implementación, interoperabilidad, entre otros aspectos. Por ello, a continuación se mencionan los desafíos más significativos de una red VANET:

- **Autenticación:** en una red vehicular se hace necesaria la autenticación de los remitentes con el fin de garantizar que los mensajes son enviados por los nodos reales y, por lo tanto, se reduzcan los ataques realizados por desconocidos.

- **Costos de implementación:** la implementación final de las OBU, RSU y demás elementos de las redes VANET aún se encuentra lejos para potenciales usuarios de muchos países, debido a los altos costos de dichos dispositivos.
- **Seguridad:** una red VANET utiliza un canal inalámbrico, por lo cual es vulnerable a accesos no autorizados y requiere de mecanismos que protejan la información.
- **Normatividad en los países:** dadas las reglamentaciones y leyes en materia de tráfico vehicular en las que cada país establece reglas y permisos, la implementación de las redes VANET puede verse afectada, limitando su implementación.

1.7. APLICACIONES

Las aplicaciones soportadas por las redes VANET van desde un simple intercambio de mensajes entre nodos hasta transmisión de información más compleja. Dichas aplicaciones gestionan todos los aspectos y situaciones involucradas con el transporte terrestre, como la descongestión del tráfico o la prevención de un accidente de tránsito.

Los tipos de aplicaciones en redes vehiculares son diversos y se destacan aplicaciones de seguridad, aplicaciones comerciales, aplicaciones de apoyo y aplicaciones de gestión del tráfico. Sin embargo, el objetivo de desarrollar este tipo de redes es el mejoramiento de la seguridad vial en todos los aspectos, por lo que se asigna una prioridad a cada categoría de aplicación; otorgándosele la mayor a las relacionadas con la seguridad de la vida de una persona. El desempeño de las aplicaciones está sujeto al rendimiento de la red inalámbrica y a la integración de la interfaz de red con el receptor GPS, los diferentes sensores ubicados en el vehículo y con la OBU. A continuación se presenta una descripción de las principales categorías en las que se dividen las aplicaciones para VANET.

1.7.1. Aplicaciones de seguridad

Este tipo de aplicaciones son el objetivo y beneficio primordial de las redes vehiculares y tienen como función brindar información a los conductores de forma precisa acerca de los eventos que están presentes en su trayecto. De esta manera, contribuir a que la conducción y el desplazamiento por las vías sean más seguros.

1.7.2. Aplicaciones Comerciales

Estas aplicaciones están enfocadas a incrementar el confort por parte de los usuarios del automóvil, ya que permiten realizar acciones de pago y entretenimiento como descargar música, pagar peajes o parqueos y actualizar los sistemas de navegación, entre otras.

1.7.3. Aplicaciones de Apoyo

Tienen como objetivo brindar control y monitoreo sobre los automóviles en las vías, garantizando una colaboración en la tarea de entidades como son la policía, los bomberos, etc. Este tipo de aplicaciones pretenden disminuir los índices de infractores y de criminalidad en las calles.

1.7.4. Aplicaciones de gestión del tráfico

La finalidad de estas aplicaciones es guiar a su destino a la persona que va conduciendo mediante la premisa de una conducción más fluida. Esto es, evitar o prevenir los embotellamientos en las vías mediante el uso de rutas alternativas frente a una eventualidad.

La Tabla 3 presenta una síntesis de la clasificación de las aplicaciones en redes VANET.

Categoría	Prioridad	Palabra Clave	Propósito o Situación	Ejemplos
Aplicaciones de seguridad.	1	Peligro	a. Peligro por colisión	1. Presencia de peatones.
				2. Cambio de carril.
			3. Luces de freno de emergencia.	
			b. Colisión inminente	1. Detección pre-colisión.
			c. Incidente ocurrido	1. Aviso post-colisión. 2. Servicios de S.O.S
d. Estado de la vía	1. Vía en obras de construcción.			
e. Peligro en la vía	1. Advertencia curva peligrosa. 2. Advertencia pare inesperado.			
Aplicaciones comerciales	4	Comodidad paga.	a. Mantenimiento del vehículo	1. Diagnóstico Inalámbrico.
				2. Actualización de Software.
			3. Aviso de mantenimiento.	
b. Servicios móviles	1. Servicio de Internet. 2. Mensajería instantánea. 3. Aplicaciones P2P.			
c. Comercio electrónico	1. Pago de peaje. 2. Pago de gasolina.			
Aplicaciones de apoyo.	3	Emergencia.	a. Soporte para autoridades.	1. Licencia electrónica de conducción.
				2. Rastreo de vehículos Robados.
				3. Historial de Infracciones.
Aplicaciones de gestión del tráfico.	2	Flujo y eficiencia.	a. Tráfico eficiente.	1. Aviso aproximación a vehículo con emergencia
				2. Servicios de emergencia en escena
				1. Navegación y Vías optimizadas.
				2. Asistente limitador de velocidad.
				3. Control inteligente del flujo del tráfico.

Tabla 3. Síntesis de las aplicaciones en redes VANET. Adaptado de [3].

Los conceptos básicos descritos a lo largo de este capítulo constituyen, en términos generales, una síntesis de lo que es una red vehicular. Se establecen las causas y los propósitos fundamentales del surgimiento de este tipo especial de redes para mejorar la movilidad y seguridad de los conductores por medio de aplicaciones de gestión de tráfico y seguridad. En el siguiente capítulo se abordarán algunas de las principales técnicas de acceso al canal inalámbrico en este tipo de redes.

CAPÍTULO 2. TÉCNICAS DE ACCESO EN REDES VANET

2.1. INTRODUCCIÓN

Una técnica de acceso es una estrategia de gestión por parte de la red con el fin de administrar en qué momento y de qué manera los nodos transmiten información y acceden al canal radio compartido; esto con el objetivo de prevenir las colisiones y maximizar el rendimiento y la eficiencia en el uso del ancho de banda disponible. El rol de una técnica de acceso es fundamental para que las redes vehiculares presenten beneficios en materia de movilidad y seguridad para los usuarios.

Factores como la velocidad de los nodos, la movilidad y los constantes cambios de topología, entre otros, hacen que las redes vehiculares presenten retos adicionales para las técnicas de acceso. Por esto, en la bibliografía consultada se encuentra una cantidad considerable de técnicas, las cuales proporcionan un desempeño adecuado para este tipo de redes en particular.

La importancia de este capítulo radica en presentar la variedad de las técnicas de acceso existentes y establecer sus principales características y métodos de funcionamiento en el contexto de las redes vehiculares.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS [11,12]

Existen conceptos básicos en una técnica de acceso que se deben tener en cuenta para analizar el funcionamiento de éstas. Por esto, a continuación se presenta una recopilación de los conceptos más importantes.

2.2.1. Conceptos asociados a la técnica de acceso.

- **Acknowledgement (ACK):** es un mensaje de acuse de recibo que el receptor de la comunicación envía al emisor para confirmar la recepción de un mensaje.
- **Backoff:** es un algoritmo que define el tiempo de espera que tiene un nodo antes de realizar un proceso de retransmisión.
- **Canal de control:** es el canal destinado para la transmisión de la información de control en la comunicación.
- **Canal de datos:** es el canal destinado para la transmisión de la información de datos en la comunicación.
- **Clear To Send (CTS):** es un mensaje del nodo receptor como respuesta a la solicitud de transmisión del emisor, indicándole que puede iniciar la transmisión.
- **Colisión:** cuando dos transmisiones se traslapan en el tiempo.
- **Evasión de colisión:** es el proceso mediante el cual se pronostica una colisión con el fin de evitarla y reducir problemas.
- **Fase de contienda:** es un periodo de tiempo en el que los nodos de la red compiten entre sí, con el objetivo de acceder al medio.
- **Fase de no contienda:** es un periodo de tiempo en el que los recursos de red se asignan bajo reserva entre los nodos que quieren acceder al medio.

- **Request To Send (RTS):** es un mensaje que se utiliza para indicar el deseo de transmitir datos.
- **Handshake:** es un acuerdo que se hace entre emisor y receptor mediante el intercambio de paquetes RTS, CTS y ACK; con el fin de establecer los parámetros para una comunicación exitosa entre dichos nodos.
- **Mecanismo:** es un proceso interno de una técnica de acceso que determina el funcionamiento de ésta, basándose en un conjunto de pasos a seguir frente a una situación previa. El funcionamiento de una técnica de acceso se compone estructuralmente de uno varios mecanismos.
- **Overhead (Sobre-encabezamiento):** hace referencia al uso ineficiente de ancho de banda a causa de la cantidad de información adicional, necesaria para gestión y control presente en los paquetes de una red.
- **Resolución de colisión:** es un proceso que se produce a partir de una colisión ocurrida con el fin de contrarrestar los efectos negativos del canal.
- **RPTS-APTS:** es el intercambio entre los paquetes RPTS y APTS que se utiliza para determinar el nivel de potencia de transmisión mínima que hará que una recepción de paquetes tenga éxito en el receptor.

2.2.2. Conceptos asociados a la red.

- **Control central:** es una estación central generalmente denominada estación base, encargada de gestionar los recursos de la red para los nodos.
- **Escalable:** es aquel sistema que puede manejar la adición de usuarios y recursos sin sufrir una pérdida notable de rendimiento o aumento de la complejidad administrativa.
- **Quality of Service (QoS):** es la garantía de un cierto nivel de rendimiento para un tipo de flujo de datos en una red, evaluado en parámetros como el servicio de la red, la tasa de error, el ancho de banda, retardo en la transmisión, disponibilidad, *jitter*, entre otros.
- **Reactivo:** es un estado de adaptación constante a los posibles cambios.
- **Sordera:** es un efecto de no escucha que se produce cuando las antenas direccionales se bloquean y no pueden detectar los paquetes.
- **Terminal expuesto:** es cuando una estación escucha el canal y cree que se encuentra ocupado, pero en realidad el canal está libre pues el nodo que está causando el estado de ocupado en realidad no le interfiere en su radio de comunicación.
- **Terminal oculto:** es cuando una estación escucha el canal y cree que se encuentra libre, pero en realidad está ocupado por otro nodo al que no escucha porque está fuera de su área de cobertura.

2.3. TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO EN UNA VANET [13]

Dada la naturaleza de los servicios de seguridad en las redes VANET, la transmisión se realiza en modo *broadcast* a todos los vehículos que estén dentro del área de cobertura. En estas redes, la técnica de acceso busca garantizar el acceso a los recursos radio, además de un ancho de banda equitativo entre todos los vehículos que se hagan parte de la red sin priorizarlos. Lo anterior con el fin de que todos los nodos puedan efectuar sus transmisiones en algún instante de tiempo.

Dentro del estudio realizado, es fundamental identificar cuáles son las técnicas de acceso de las redes VANET más referenciadas en la literatura, con el fin de establecer sus principales características y comprender su forma de operación. Las técnicas de acceso se clasifican como: con contención, libres de contención e híbridas, como se muestra en la Figura 8.

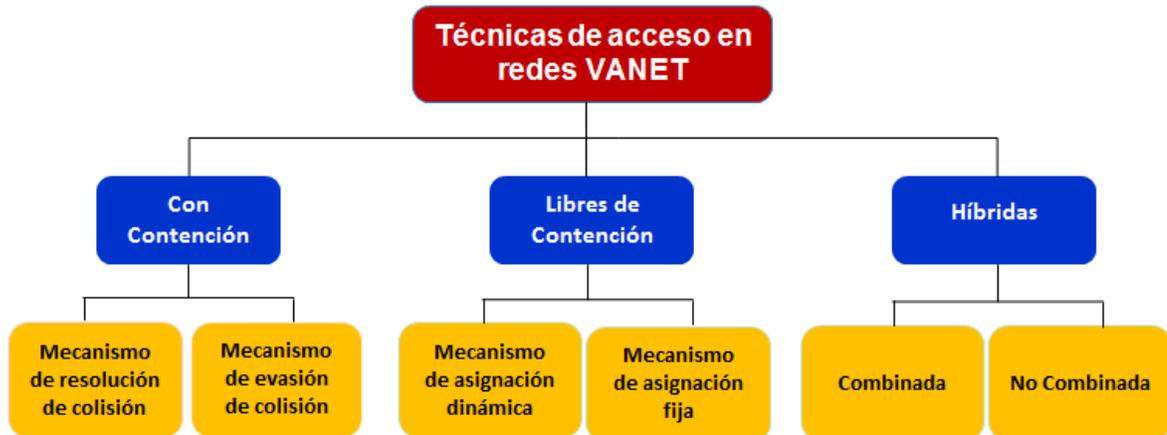


Figura 8. Clasificación de las técnicas de acceso en redes VANET. Por los autores.

2.3.1. Con Contención

Son técnicas de acceso en las cuales los nodos de la red compiten entre sí de forma aleatoria por acceder al canal, lo que hace que se presenten colisiones. Ofrecen una gran flexibilidad a la red por no tener que seguir un orden estricto de transmisiones, no se hacen reservaciones *a priori* y el retardo de acceso al canal no es predecible.

Las técnicas con contención se destacan por la utilización de un mecanismo para enfrentar las colisiones. Existen dos tipos: mecanismo de resolución de colisión y mecanismo de evasión de colisión.

- **Mecanismo de resolución de colisión:** ejecuta un proceso de retransmisión al presentarse una colisión en la red, con el fin de garantizar que los paquetes lleguen a su destino y reducir la probabilidad de que se generen nuevas colisiones.
- **Mecanismo de evasión de colisión:** es el establecimiento de la ocupación del medio determinado por su fase de contienda, con el fin de evadir las colisiones y reducir los problemas presentados.

La Tabla 4 describe algunas de las técnicas de acceso con contención encontradas en la literatura.

Técnica de Acceso	Características	Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Con Contención – Mecanismo de evasión de colisión				
D-MAC [14,15] (<i>Directional Medium Access Control, Control de Acceso al Medio Direccional</i>)	- Antenas directivas. - Uso de GPS.	- El emisor inicia un acuerdo de transmisión con el receptor mediante el intercambio de mensajes RTS/CTS y ACK. El emisor inicialmente envía un RTS omnidireccional con la ID del receptor. - Todos los demás nodos vecinos, tanto del emisor como del receptor que reciben el RTS, bloquean sus antenas para no interferir. Se ejecuta el <i>handshake</i> entre emisor y receptor, y se procede a transmitir.	- Se aumenta el reuso del canal. - Se disminuyen las interferencias y colisiones. - Soluciona el problema de terminal oculto y de terminal expuesto.	- Sistemas de alta complejidad a la hora de implementarlos. - Se presenta sordera por parte de las antenas cuando la carga de la red es muy elevada.
BTMA [16] (<i>Busy Tone Multiple Access, Acceso Múltiple por Tono Ocupado</i>)	- Multicanalización.	- Cuando un nodo quiere transmitir, primero escucha el medio a través del canal de control. - Si el canal de control se encuentra vacío, se procede a transmitir la información en el canal de datos y simultáneamente se transmite una señal de ocupado en el canal de control. - Todos los demás vecinos, tanto del transmisor como del receptor que escuchan el medio y perciben la señal de ocupado, también comunican este estado.	- Se soluciona el problema del terminal oculto.	- No soluciona adecuadamente el problema del terminal expuesto.
RI-BTMA [17] (<i>Receiver Initiated Busy Tone Medium Access, Receptor Iniciado por Acceso al Medio por Tono Ocupado</i>)	- Multicanalización	- Para realizar la transmisión, un nodo primero escucha el medio. - Si el canal se encuentra vacío envía un preámbulo en donde especifica la dirección del receptor y vuelve a escuchar el canal de control. - Si el receptor escucha correctamente el preámbulo, transmite la señal de ocupado en el canal de control, el cual es escuchado por el transmisor. - En caso de que el transmisor no escuche la señal de ocupado del receptor, intenta retransmitir.	- Soluciona el problema del terminal oculto y el problema del terminal expuesto.	- Problemas de sincronización. - Problemas de detección de receptores.

<p>PAMAS [18] (Power Aware Medium Access control with Signaling, Control de Acceso al Medio Consciente de Potencia con Señalización)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Multicanalización. - Gestión de consumo de energía. - Requiere mecanismos de sincronización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando un nodo quiere transmitir, primero escucha el canal de control, después realiza un <i>handshake</i> con el receptor. Después de recibir el CTS, el emisor transmite la información y también emite un tono de ocupado en el canal de control. Cuando el canal de control se encuentra ocupado, “apaga” su dispositivo radio durante el estado ocupado. Una vez transcurrido el tiempo, el nodo vuelve a encender el dispositivo radio y vuelve a escuchar el canal de control. 	<ul style="list-style-type: none"> - Soluciona el problema del terminal oculto. - Uso eficiente de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas de retardo debido al estado de apagado por parte de los nodos.
<p>DCA-PC [19,20] (Dynamic Channel Assignment with Power Control, Asignación Dinámica de canal con Control de Potencia)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Multicanalización - Control de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando un nodo quiere transmitir, realiza un <i>handshake</i> con el destinatario por medio del canal de control, acordando el sub-canal de datos a usar y el nivel de potencia. Posteriormente se realiza la transmisión de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor <i>throughput</i>. - Soporta QoS. - Reuso de canales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor uso de potencia en comparación con DCA. - Problemas de sobre encabezamiento.
<p>PCM [21] (Power Control Medium Access Control, Control de Acceso al Medio con Control de Potencia)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Control de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - En el momento en que un nodo quiere transmitir escucha el medio y realiza un <i>handshake</i> con el receptor. - Los mensajes RTS/CTS se transmiten con el máximo nivel de potencia. - Los paquetes de datos se transmiten con un nivel de potencia oscilante entre el máximo y el mínimo, de manera periódica. - Los mensajes ACK se transmiten con el mínimo nivel de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso eficiente de la potencia. - Reducción de las retransmisiones. - Obtención de niveles de <i>throughput</i> similares a los de IEEE 802.11 con un menor consumo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta complejidad al implementarse debido a los constantes cambios en los niveles de potencia. - No se evitan completamente las colisiones. - Problemas de desvanecimiento.
<p>RBAR [22,23] (Receiver Based Auto Rate, Receptor basado en Auto Tasa)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa de transferencia de los enlaces variable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un nodo que desea transmitir primero escucha el medio y después realiza un <i>handshake</i> con el receptor. - En dicho intercambio de paquetes RTS/CTS, el receptor le informa la máxima tasa de transferencia con la cual le debe transmitir el emisor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce las retransmisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta capacidad computacional.

<p>CSMA/CA [24,25,26,27,28] (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Escucha el canal antes de transmitir. - Utiliza ACK. - Utiliza <i>backoff</i>. 	<p>Las estaciones que tengan datos para enviar escuchan el medio, si permanece libre durante un período igual a DIFS¹, la estación puede transmitir de forma inmediata. De lo contrario, si el medio está ocupado, la estación debe esperar un intervalo DIFS seguido de un período aleatorio de <i>backoff</i> y el receptor responde (después de esperar un tiempo SIFS²) si el paquete ha sido recibido sin errores. Si otra estación ocupa el medio durante este período de <i>backoff</i>, el temporizador se detiene.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evita las colisiones de datos. - Es confiable debido a que los datos se envían continuamente hasta que el canal permanezca libre. 	<ul style="list-style-type: none"> -Relativamente lenta, ya que todos los nodos que quieran enviar datos deben escuchar el canal continuamente y se puede presentar congestión. -No es adecuada para redes de gran tamaño.
<p>MACAW [29,30] (Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless, Acceso Múltiple con Evasión de Colisiones para Inalámbricas)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza el intercambio de cinco mensajes para una transmisión de paquetes de datos. 	<p>El emisor envía una solicitud RTS para transmitir y, si el receptor está disponible, envía un CTS. Consecuentemente, si los nodos vecinos escuchan el CTS permanecen en silencio; de lo contrario si escuchan el RTS pero no escuchan el CTS permanecen en silencio hasta que el CTS regrese al emisor o hasta que el receptor envíe un ACK al recibir una trama.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora en la equidad del protocolo mediante el uso de un <i>backoff</i> diferente, debido a que se ejecuta por separado para cada flujo de datos (por origen-destino), en lugar de hacerlo para cada estación. - Utiliza un acuse de recibo positivo (ACK). 	<ul style="list-style-type: none"> -No resuelve el problema del terminal oculto y del terminal expuesto.
<p>M-MAC [31] (Mobility-Adaptive Medium Access Control, Movilidad Adaptativa en el Control de Acceso al Medio)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Su desempeño depende de la configuración de la topología y de los patrones de flujo en el sistema. - Transmisión multi-salto. - Uso de antenas direccionales. 	<p>Utiliza múltiples saltos para enviar los mensajes RTS con el fin de establecer enlaces entre nodos distantes. Luego, el CTS, los paquetes de datos y el ACK son enviados en un solo salto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alcanza mejores resultados de <i>throughput</i> y retardo frente a la técnica D-MAC. 	<ul style="list-style-type: none"> - Con la utilización de antenas direccionales se introducen problemas como: nuevos tipos de terminales ocultos, mayor interferencia direccional y sordera.

¹ *Distributed InterFrame Space* (DIFS): es el tiempo que debe esperar un nodo para realizar el procedimiento de *backoff*, en caso de que el medio este ocupado.

² *Short Interframe Space* (SIFS): es el mínimo espacio entre paquetes y es utilizado para separar transmisiones correspondientes al mismo diálogo. Su valor está determinado por la capa física con el fin de que la estación transmisora pueda conmutar a receptor y decodificar el paquete entrante.

<p>FAMA [32] (Floor Acquisition Multiple Access, Acceso Múltiple por Umbral de Adquisición)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso de adquisición para obtener el control del canal. - El emisor utiliza detección de portadora y realiza el intercambio de mensajes de control RTS-CTS. 	<p>Operación mediante detección de portadora con el fin de prevenir colisiones entre el nodo remitente y el nodo receptor de un paquete. Posee dos variaciones: la primera con intercambio de RTS-CTS sin detección de portadora que utiliza la técnica ALOHA para transmitir mensajes RTS, y la segunda el intercambio de RTS-CTS con la detección de portadora no persistente CSMA con el mismo objetivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor eficiencia frente a la técnica MACAW. - Solución para el problema del terminal oculto mediante el umbral de adquisición y el intercambio RTS. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mensajes de control excesivamente largos.
<p>DBTMA [33,34] (Dual Busy Tone Multiple Access, Acceso Múltiple por Doble Tono de Ocupado)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Enfoque RTS-CTS. - Canales de señalización y de datos separados. 	<p>Divide el canal en dos subcanales, de los cuales uno es para la transmisión de datos y el otro es para transmitir las señales de control. Dos tonos de ocupado se asignan en el canal de control: BT_t^3 muestra que un nodo está transmitiendo en el canal de datos, y BT_r^4 muestra que un nodo está recibiendo en el canal de datos. Los dos tonos de ocupado son ondas sinusoidales en dos frecuencias diferentes, con suficiente separación espectral.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Resolución del problema del terminal oculto y el terminal expuesto. - DBTMA supera a FAMA significativamente por lo que justifica su mayor costo en el hardware complejo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere un canal y transceptores adicionales. - Requiere dos transmisores de banda estrecha. - No cuenta con acuse de recibo.
<p>MARCH [35] (Media Access with Reduced Handshake, Acceso al Medio con Handshake Reducido)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del <i>handshake</i>. - Escucha paquetes CTS. 	<p>Opera de modo que el mensaje RTS es utilizado solo para el primer paquete del flujo, desde el segundo paquete en adelante sólo se utiliza el mensaje CTS. Un nodo obtiene información sobre las llegadas de paquetes de datos en sus nodos vecinos al oír los mensajes CTS transmitidos por ellos. A continuación, envían mensajes CTS al nodo vecino en cuestión para transmitir datos de ese nodo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora el rendimiento al reducir la sobrecarga de control - Alto rendimiento de la capacidad del canal, arrojando resultados adecuados de <i>throughput</i> para redes vehiculares. - No requiere ningún mecanismo de predicción de tráfico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependencia total del mensaje CTS para su funcionamiento.

³ BT_t (The Transmit Busy Tone, Tono de Ocupado para la Transmisión).

⁴ BT_r (The Receive Busy Tone, Tono de Ocupado para la Recepción).

<p>PCMA [36] (Power Controlled Multiple Access, Acceso Múltiple Controlado por Potencia)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Control de potencia de transmisión. - Multicanalización 	<p>El funcionamiento de esta técnica se basa en la utilización de dos canales y en la evasión de colisiones, que utiliza un modelo de potencia limitada. Antes de la transmisión de datos, el remitente envía una Petición de tipo RPTS⁵ en el canal de datos al receptor. El receptor responde con un mensaje de tipo APTS⁶. Después de este intercambio, los datos reales se transmiten y se confirma con un mensaje ACK.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evita la interferencia con otros nodos vecinos que no están involucrados en el intercambio de paquetes, mediante el control de potencia del transmisor. - Se resuelven las colisiones por el uso de estrategias de <i>backoff</i> apropiadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requieren medidas de control de potencia para que el receptor decodifique el paquete. - Problemas del paquete ACK debido a que el nivel de ruido en la fuente no se puede actualizar durante la transmisión de datos.
Con Contención – Mecanismo de resolución de colisión				
<p>ALOHA⁷ [37,38,39]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de espera aleatorio. - No divide el tiempo en ranuras discretas. 	<p>Su funcionamiento está basado en permitir a los nodos transmitir cuando tengan datos para enviar. Si existe colisión y la trama se destruye, el nodo emisor espera un tiempo aleatorio para volver a enviar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El nodo emisor conoce si la trama fue destruida o no al escuchar el canal. 	<ul style="list-style-type: none"> - El número de colisiones crece cuando la carga aumenta. - Los paquetes en colisión se dañan.

Tabla 4. Técnicas de acceso con contención. Por los Autores.

⁵ Request Power To Send (RPTS): es un paquete que se envía en el canal de datos hacia el receptor.

⁶ Accept Power To Send (APTS): es un paquete de respuesta a una petición en el canal.

⁷ ALOHA: hace referencia a la primera red de comunicación creada en Honolulu, Hawái.

2.3.2. Libres de contención

Son técnicas en las que un nodo tiene el acceso garantizado al canal mediante la asignación de las transmisiones en la que siempre hay un orden lógico en los nodos a transmitir, razón por la cual el retardo del acceso al canal es predecible y limitado. Este tipo de técnicas requieren de un control centralizado que, en el caso de las redes inalámbricas, está ausente.

Las técnicas libres de contención se destacan por los modos de asignación de transmisión en un mecanismo entre los cuales existen dos tipos: mecanismo de asignación fija y mecanismo de asignación dinámica.

- **Mecanismo de asignación fija:** es la asignación del turno de transmisión de un tamaño fijo a cada nodo en el canal, independientemente de lo que tenga que transmitir.
- **Mecanismo de asignación dinámica:** es la asignación del canal a cada nodo cuando tiene algo que transmitir y se realiza dependiendo de la demanda de tráfico que haya en la red.

La Tabla 5 presenta algunas de las técnicas de acceso libres de contención encontradas en la literatura.

Técnica de Acceso	Características	Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Libres de Contención – Mecanismo de asignación fija				
TDMA [40] (Time Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo)	<ul style="list-style-type: none"> - Canal común para comunicaciones entre múltiples usuarios. - Estructura de información dividida en slots de tiempo. - Requiere de Sincronización. - Gestión de recursos predefinida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los usuarios comparten un canal físico donde se les asigna un periodo de tiempo (Time Slot), que se repite dentro de un grupo de espacios llamados tramas. - Un usuario solo puede transmitir en el slot que le pre-asignaron. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo consumo de energía para un dispositivo gracias a que las transmisiones son en porciones de tiempo. - No hay interferencia para transmisiones simultáneas. - Uso más eficiente del espectro. 	<ul style="list-style-type: none"> - No es escalable. -Distorsión por multitrayecto. - Necesita de un control centralizado.
FDMA [41] (Frequency Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Frecuencia)	<ul style="list-style-type: none"> - Multicanalización. - Gestión de recursos predefinida. 	<ul style="list-style-type: none"> -Divide el ancho de banda en subcanales donde a cada nodo se le asigna un canal secundario, con el cual siempre tiene la posibilidad de transmitir y los usuarios pueden disponer de una comunicación en cualquier momento, debido a que cada uno tiene un radiocanal dentro del ancho de banda disponible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Su uso prevalece gracias a que es utilizada en combinación con TDMA en sistemas como GSM, el cual se encuentra actualmente en vigencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - No es escalable. -Problemas de interferencia entre canales adyacentes. -Requieren un mecanismo central. -Uso ineficiente del espectro.
FPRP [42,43] (Five Phase Reservation Protocol, Protocolo de Reserva de Cinco Fases)	<ul style="list-style-type: none"> - Divide el tiempo en paquetes. - Requiere mecanismo de sincronización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando un nodo quiere acceder a una transmisión, debe esperar una trama de reserva para apropiarse de un slot de información mediante su fase de contienda con otros nodos. Una vez reservado el slot de información puede ser usado por el nodo en tramas consecutivas hasta acabar su transmisión. La etapa de contienda está compuesta por 4 fases que son: petición de reserva, reporte de colisión, confirmación y reconocimiento de reserva y transmisión RTS. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es escalable - Soluciona adecuadamente el problema del sobre encabezamiento. - Compatible con topologías cambiantes y nodos móviles. 	<ul style="list-style-type: none"> -Problemas en la asignación de recursos. - Problemas de retardos. -Estructura de trama compleja.
CDMA [44] (Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Código)	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en el principio de ortogonalidad de las señales. - Mayor capacidad de tráfico y ancho de banda utilizado. 	<p>Cada nodo recibe un código ortogonal respecto a los códigos de los otros nodos y la transmisión se realiza simultáneamente y con igual frecuencia pero cada uno con una codificación específica. Esto es, los nodos pueden transmitir a cualquier frecuencia y durante todo el tiempo que requiera el canal pues las señales no interfieren las unas con las otras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor ancho de banda. - Recepción libre de interferencia entre los canales. - Se aprovechan las distintas señales recibidas para sumar constructivamente la potencia recibida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de tecnología que permita un tráfico a gran velocidad. -Número de nodos simultáneos limitado por la relación señal a ruido, las redundancias de datos y el tipo de receptor.

Libres de Contención – Mecanismo de asignación dinámica				
<p>MCTRP [45,46] (Multi-Channel Token Ring Protocol, Protocolo Token Ring Multicanal)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Agrupa el número total de nodos en anillos. - Multicanalización. - Requiere mecanismos de sincronización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un nodo sólo puede transmitir cuando es su turno de hacerlo en el anillo. Dicho turno es otorgado por el nodo fundador del anillo. - El nodo fundador del anillo es el encargado de establecer el anillo y gestionarlo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora el retardo para los mensajes de seguridad en una red vehicular. - Mejora la propagación de mensajes en general en una red vehicular. -Compatibilidad con el estándar IEEE 802.11p. - Mejora el acceso al canal de un nodo dependiendo de lo que necesite transmitir. 	<ul style="list-style-type: none"> -Problemas de desvanecimiento. -Desempeño dependiente del turno asignado en el anillo.
<p>DPSM [47] (Dynamic Power Saving Mechanism, Mecanismo Dinámico de Ahorro de Potencia)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ahorro de energía mediante periodos de estado de suspensión y despertar. 	<p>Es una variación del esquema de IEEE 802.11 que utiliza dinámicamente <i>Ad Hoc</i> mediante ventanas de indicación de mensajes de tráfico (ATIM)⁸ para lograr mayores tiempos de suspensión para nodos. El tiempo se divide en intervalos <i>beacon</i> utilizados para sincronizar los nodos. Al comienzo de los intervalos <i>beacon</i>, cada nodo debe permanecer despierto durante un tiempo fijo llamado ventana ATIM.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Los diferentes tamaños de ventana permiten que los nodos emisor y receptor entren en estado de suspensión inmediatamente después de haber transmitido paquetes anunciados en la anterior trama ATIM. 	<ul style="list-style-type: none"> -Problemas de rendimiento por el tamaño fijo de la ventana de indicación de mensajes de tráfico. -No adecuada para redes multi-hop <i>ad hoc</i>, ya que asume que los relojes de los nodos son sincronizados y la red está conectada.
<p>MMAC [48,49] (Multi-channel Medium Access Control, Control de Acceso al Medio Multicanal)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reactivo a cambios en los patrones de movimiento. - Requiere sincronización. - Aplica mecanismos de predicción de movilidad. - Agrupa los nodos en clusters. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando un nodo quiere transmitir, lo hace en el slot asignado dentro de la trama por el AP del cluster⁹ - Al principio de cada trama, determina previamente a cada nodo su movimiento dentro de la siguiente trama y se la transmite al AP. - El AP del cluster recoge toda esa información de cada uno de los miembros. Posteriormente, el AP retransmite de forma <i>broadcast</i> en el último slot de la trama todas las posibles posiciones de los miembros del cluster. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incrementa la seguridad del tráfico para los vehículos. - Asignación dinámica del tamaño de los paquetes y de los slots de cada trama. - Asignación dinámica del tiempo entre paquetes. - Buen índice de escalabilidad. - Puede funcionar paralelamente con otras técnicas de acceso. 	<ul style="list-style-type: none"> -Demanda una alta capacidad computacional. -Dependencia crítica del funcionamiento del mecanismo de predicción que utiliza. -La predicción se basa primordialmente en estadísticas. -Requiere sincronización.

Tabla 5. Técnicas de acceso libres de contención. Por los Autores.

⁸ *Ad-hoc Traffic Indication Message* (ATIM): es un mensaje que se utiliza para señalar a los nodos receptores, el estado de los paquetes listos para su transmisión.

⁹ Cluster: es un grupo de nodos que comparten características de tráfico similares como velocidad, aceleración, dirección de movimiento y se tratan como una sola entidad.

2.3.3. Híbridas

Son técnicas de acceso que se destacan por presentar simultáneamente dos tipos de características: con contención y libres de contención, además de presentar integración de una o más técnicas utilizadas para la gestión de los recursos de la red; lo anterior con el fin de brindar una técnica mejorada para la implementación en una red VANET.

Las técnicas híbridas se caracterizan por la forma de utilizar las características de dos o más técnicas y existen dos tipos: técnicas de acceso combinadas y no combinadas:

- **Técnica de acceso combinada:** son técnicas que se caracterizan por establecer una combinación de mecanismos basados en contención y libres de contención, en el preciso instante en el que un nodo intenta acceder al medio.
- **Técnica de acceso no combinada:** se caracterizan por recopilar dos o más técnicas de acceso para utilizarlas en conjunto y de forma complementaria, sin combinar una con otra. Dependiendo de los nodos involucrados en la transmisión y de las condiciones de la red se toma la decisión de la forma en que se gestionarán los recursos de red.

Las principales técnicas híbridas se presentan en la Tabla 6.

Técnica de Acceso	Características	Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Híbrida - Combinada				
RR-ALOHA [50,51] (<i>Reliable Reservation ALOHA</i> , ALOHA de Reservación Confiable)	<ul style="list-style-type: none"> - Divide el tiempo en slots. - Mecanismos de reserva. - Requiere mecanismos de sincronización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando un terminal quiere transmitir, reserva un slot de tiempo que se encuentre libre dentro de una trama. El terminal transmite de manera consecutiva en ese slot. - Cada nodo conoce el estado de todos los slots de una trama, mediante un FI¹⁰. Los estados son: libre, ocupado y colisión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Soluciona el problema del terminal oculto y el problema del terminal expuesto. - Mejora el retardo para redes vehiculares. 	<ul style="list-style-type: none"> -No es escalable. -Problemas de colisiones por accesos simultáneos. -Problemas de sobre encabezamiento con número elevado de usuarios.
MS ALOHA [52,53] (<i>Mobile Slotted ALOHA</i> , ALOHA Ranurado Móvil)	<ul style="list-style-type: none"> - Divide el tiempo en slots. - Descentralizado - Orientado a conexión. - Requiere sincronización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Su funcionamiento es muy similar al de RR-ALOHA, al ser éste la base de MS-ALOHA. - Se añade un tiempo de guarda entre tramas consecutivas para facilitar la sincronización. - Para combatir el sobre encabezamiento se usa un identificador de nodo de menor tamaño, en lugar de la dirección MAC estándar. - Se añade un estado de slot más a los tres ya establecido en RR-ALOHA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evita el problema del terminal oculto. - Es escalable. - Compatibilidad y coexistencia con el estándar 802.11p 	<ul style="list-style-type: none"> -Problemas de sobre encabezamiento.
ADHOC MAC [54,55] (ADHOC Medium Access Control, Control de Acceso al Medio ADHOC)	<ul style="list-style-type: none"> -Utiliza TDMA dinámico y R-ALOHA, para coordinar las transmisiones entre nodos. 	<p>Funciona en un canal ranurado de tiempo, es decir, los límites de la ranura tienen en cuenta el tiempo máximo de propagación entre nodos que pertenecen a un mismo grupo, para que los paquetes puedan ser transmitidos y recibidos en cualquier lugar dentro de la misma ranura de tiempo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Asignación de canales a los nodos de acuerdo a las necesidades. - Gracias a la utilización de R-ALOHA cuando la transmisión es exitosa, se reservará la ranura para el nodo en los siguientes paquetes y ya no puede ser visitada por otros nodos hasta que se libera el canal. 	<ul style="list-style-type: none"> -El medio no se utiliza de manera eficiente. -Restricción en el número de vehículos en la misma área debido a que no debe ser mayor que el número de ranuras en la trama de tiempo. - Problemas del terminal oculto.
A-ADHOC MAC [56] (<i>Adaptive AD-</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Divide el tiempo en slots. - Mecanismos de reserva. - Requiere mecanismos de 	<ul style="list-style-type: none"> - Su funcionamiento es similar al de AD-HOC MAC, al ser éste la base de A-ADHOC MAC. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mayor eficiencia respecto a AD-HOC MAC en redes vehiculares. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sistemas y operación complejos de implementar. -Problemas en la difusión de

¹⁰ *Frame Information* (FI): es un vector espejo de la trama. Permite reservar un campo específico para cada nodo.

<p>HOC Medium Access Control, Control de Acceso al Medio AD-HOC Adaptativo)</p>	<p>sincronización. - Protocolo reactivo a cambio de topología.</p>	<p>- Se establece como variable el largo de una trama y el número de slots, para incrementar la eficiencia del canal de acuerdo a cómo se vaya presentando el tráfico en la red.</p>	<p>- Es escalable y robusto.</p>	<p>mensajes en entornos urbanos.</p>
<p>CSAP [57] (Concurrent Slot Assignment Protocol, Protocolo Concurrente de Asignación de Slots)</p>	<p>- Divide el tiempo en slots. - Requiere mecanismos de sincronización.</p>	<p>- Una trama se divide en slots, los cuales se dividen en 2 sub-slots: de datos y de estado de colisión cada uno. - Cuando un nodo quiere transmitir, se apropia de un slot que esté libre dentro de la trama. - Cada nodo en su slot transmite sus datos y, en el sub-slot de estado de colisión transmite de manera <i>broadcast</i> su perspectiva de todos los slots de la trama dentro de la red en un vector <i>bitmap</i>.</p>	<p>- Soluciona el problema del terminal oculto. - Asignación de slots de forma probabilística, en cuanto a la actividad recurrente de un nodo en la red.</p>	<p>- No es escalable.</p>
<p>D-PRMA [58,59] (Distributed Packet Reservation Multiple Access, Acceso Múltiple Distribuido con Reserva de Paquetes)</p>	<p>- Predefine slots de tiempo. - Requiere mecanismos de sincronización.</p>	<p>- Cada slot de una trama se divide en un número predefinido de mini-slots. - Cuando un nodo desea transmitir, contienda con otros nodos a apropiarse del primer mini-slot de un slot. - El slot completo queda reservado para el uso del nodo que gana la contienda en paquetes consecutivos hasta que termine su transmisión. -El nodo empieza su transmisión haciendo un <i>handshake</i> con el destinatario.</p>	<p>- Soluciona los problemas del terminal oculto y expuesto. - Eficiencia en la utilización del canal. - Realiza una priorización para las clases de paquetes en la red.</p>	<p>- No es escalable. - Requiere sincronización.</p>
<p>D-TDMA [60,61] (Dynamic TDMA, TDMA Dinámico)</p>	<p>- Señal de información dividida en número variable de slots de tiempo. -Requiere Sincronización. - Gestión de recursos reactiva.</p>	<p>- Divide la trama en slots de datos y mini slots. - Los slots varían en su tamaño dependiendo si son de voz, datos, etc. - Los mini-slots son utilizados por los nodos para reservar slots. - Cuando un nodo quiere hacer una transmisión utiliza S-ALOHA para adquirir un slot y posteriormente transmitir.</p>	<p>- Es escalable - Presenta buenos índices de <i>throughput</i> para redes MANET.</p>	<p>-Sub-utilización del canal cuando la carga de la red es baja.</p>
<p>R-ALOHA</p>	<p>- Es una mejora de S-ALOHA</p>	<p>- El tiempo se divide en intervalos, de</p>	<p>- Mayor eficiencia en el</p>	<p>- Requiere de disponibilidad de</p>

<p>[62,63] (Reservation ALOHA, ALOHA de Reservación)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Asignación de recursos bajo demanda. - Requiere un control central. 	<p>los cuales unos son utilizados para la reserva de recursos y otros a la transmisión de datos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cuando un usuario desea transmitir, selecciona uno de los intervalos de reserva y envía una petición; entonces el usuario debe esperar hasta que la estación base le informe que recibió correctamente su petición y los intervalos que tiene reservados para la transmisión. 	<p>sistema, debido a que los intervalos son más cortos que los dedicados a la transmisión de datos.</p>	<p>ranuras inactivas para todas las estaciones que tienen el potencial de utilizarlas sobre una base de contención.</p>
<p>STDMA [64,65] (Self-Organized Time Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo Auto-Organizado)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza una mejora en CSMA para entornos descentralizados. - Acceso al canal ilimitado - Basado en información de posición enviada por los nodos de la red. 	<p>Está basado en un algoritmo en el que los nodos están equipados con receptores GPS. El tiempo se divide en tramas como en un sistema TDMA y todas las estaciones compiten por un inicio de trama. Estas tramas se dividen en slots, que corresponde por lo general a la duración de una trama. Todos los miembros de la red comienzan determinando la cantidad de mensajes que se enviarán durante una trama.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El continuo acceso al canal garantiza que los paquetes no se descarten. - Desde la perspectiva de envío STDMA supera a la técnica CSMA durante periodos de alta utilización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependiente de la información de la posición enviada por los nodos de la red. -El peor caso de acceso de tiempo STDMA se limita e iguala al periodo de escucha más un incremento nominal.
<p>DCAP [66] (Decentral Channel Access Protocol, Protocolo de Acceso de Canal Descentralizado)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Basado en una trama ranurada de TDMA. 	<p>Guarda el estado de todos los N canales utilizando un bit por canal. Los bits son agrupados en un vector llamado <i>bitmap</i>, el cual es transmitido y respaldado como parte de cada slot utilizado. La evaluación de todos los <i>bitmaps</i> recibidos durante una trama de una estación observada junto con el estado del canal se realiza mediante estaciones propias, hasta conocer la ocupación de los canales en la detección de un salto alrededor de una estación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Probabilidades de colisión pequeñas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo rendimiento en redes de alto tráfico.
<p>HRMA [67] (Hop-Reservation Multiple Access, Acceso Múltiple)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Multicanal - Basado en <i>half-duplex</i>. 	<p>En HRMA, el tiempo es ranurado y cada ranura tiene asignada una frecuencia; dicha ranura de tiempo está dividida en periodos. Esta técnica multicanal está basada en <i>half-duplex</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cada ranura de tiempo cuenta con un canal de frecuencia separado. - Transmisión de datos sin colisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere sincronización. - Tiempo ranurado.

por Reservación de Salto)		con espectro ensanchado por salto de frecuencia. Utiliza un mecanismo de reserva y <i>handshake</i> para comunicar un par de nodos y reservar un salto de frecuencia, lo que garantiza la transmisión de datos sin colisiones incluso en presencia de terminales ocultos.		
CATA [68] (Collision Avoidance Time Allocation, Asignación de Tiempo por Evasión de Colisiones)	- Soporta una topología de red dinámica. - El tiempo está dividido en mini-slots.	Su funcionamiento se basa en dos principios básicos: 1. El receptor de un flujo debe informar a los potenciales nodos de origen sobre la ranura reservada en el que está recibiendo paquetes actualmente y así, el nodo de origen debe informar al posible nodo de destino sobre las interferencias en la ranura. 2. Uso de confirmaciones negativas al comienzo de cada ranura para la distribución de información de reserva de ranura para los remitentes de las sesiones de difusión o multidifusión.	- Funciona bien con un canal de radio <i>half-duplex</i> . - Es simple y proporciona soporte para tráfico <i>broadcast</i> y <i>multicast</i> libre de colisiones.	- No posee función de reserva.
SRMA/PA [69] (Soft Reservation Multiple Access with Priority Assignment, Acceso Múltiple de Reserva Suave con Asignación de Prioridad)	- Basado en TDMA. - Requiere sincronización. - Posee una única estructura de trama y capacidad de reserva.	Los nodos utilizan un <i>handshake</i> con evasión de colisiones y reservación suave con el fin de competir por la reservación de las ranuras de tiempo. El mecanismo de reserva suave permite que cualquier nodo de urgencia transmita los paquetes generados por una aplicación en tiempo real, para asumir el control del recurso de radio desde otro nodo de una aplicación que no es en tiempo real en base a la demanda.	- Maximización de la ganancia de multiplexación estática para servicios de voz de datos integrados. - Posee mecanismo de reserva previa del canal.	- Se presentan colisiones entre nodos que tienen la misma prioridad en el tráfico a enviar.
DMMAC [70] (Dedicated Multichannel Medium Access Control, Control de Acceso al	- Está basada en WAVE	Utiliza para el acceso al medio libre de contención las transmisiones de mensajes de seguridad, las cuales mantienen la estructura de sincronización de IEEE 1609.4, pero el esquema de CSMA/CA desde IEEE 802.11p se sustituye por una	- Las transmisiones son libre de contención debido a la utilización de la técnica TDMA para que los nodos puedan enviar libremente sus paquetes.	- Requiere sincronización. - Información de la ranura de propagación más allá de los vecinos de un salto.

Medio Multicanal Dedicado)		combinación compleja de TDMA y CSMA/CA.		
MAMBA [71] (Medium Access with Memory Bifurcation and Administration, Acceso al Medio con Administración y Bifurcación de Memoria)	<ul style="list-style-type: none"> -Nodo de recepción sólo suma ranuras de sus vecinos inmediatos. -El receptor ajusta el bit para una ranura cuando una ranura está ocupada. 	Modifica la técnica DMMAC mediante la adición de un bit extra para cada ranura. Este bit indica si el número de nodo en la ranura correspondiente se informó por el propio nodo, o si se recibió de otro nodo.	<ul style="list-style-type: none"> -Facilita la distinción de un nodo receptor al comunicar nodos alejados entre sí. -Se preservan espacios en las ranuras que, de otro modo, habrían sido consumidos por los nodos que están lejos. -Mejora el rendimiento, la relación de entrega de mensajes y la latencia frente a DMMAC. 	-El funcionamiento de esta técnica depende de la adición del bit extra.
Híbrida – No Combinada				
CLUSTERING ¹¹ [72]	<ul style="list-style-type: none"> - Divide el volumen de nodos en la red en subgrupos o clusters. - Clasificación de nodos respecto a características del tráfico. - Combinación de técnicas de acceso (<i>Meta-Protocol</i>). - Requiere mecanismos de sincronización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un nodo se denomina cabeza de grupo (CH)¹², y está encargado de gestionar el cluster. - Dentro de un cluster se establece a un nodo miembro como CH del cluster. - A cada miembro del cluster se le asigna, por su CH, un slot de tiempo para transmitir. - Cuando un nodo quiere transmitir dentro de su cluster, lo hace mediante TDMA. - Cuando un nodo quiere transmitir fuera del rango de su cluster, lo hace a través del CH de su cluster hacia el otro CH del cluster receptor, mediante CSMA/CA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Debido a la clasificación en subgrupos, se evitan problemas de interferencia. - Se enfrenta adecuadamente a los problemas del terminal oculto y el terminal expuesto. 	-Problemas de retardos y colisiones dependientes del rango de los clusters y las comunicaciones simultáneas entre nodos ubicados a cierta distancia.

Tabla 6. Técnicas de acceso híbridas. Por los Autores.

¹¹ CLUSTERING: Su nombre hace referencia a la técnica de acceso conformada por un grupo de nodos que comparten características de tráfico similares como velocidad, aceleración, dirección de movimiento y se tratan como una sola entidad.

¹² Cluster Head (CH): es un nodo que se designa como cabeza de grupo y que toma el rol de un control centralizado o estación base para los demás miembros del grupo denominado cluster.

La Tabla 7 presenta una síntesis de las técnicas de acceso previamente descritas y sus principales características.

Técnica de Acceso		Fiabilidad (ACK)	Slots	Soluciona Problema Terminal Oculto	Soluciona Problema Terminal Expuesto	Escalable	
Con contención	Mecanismo de evasión de colisión	D-MAC	Si	No	Si	Si	No
		BTMA	Si	No	Si	No	No
		RI-BTMA	Si	No	Si	Si	No
		PAMAS	Si	No	Si	No	No
		DCA-PC	Si	No	No	No	Si
		PCM	Si	No	No	No	No
		RBAR	Si	No	Si	No	Si
		CSMA/CA	Si	No	Si	Si	Si
		MACAW	Si	No	No	No	No
		M-MAC	Si	No	No	No	No
		DBTMA	No	Si	Si	Si	No
		FAMA	No	No	Si	No	No
	MARCH	Si	No	No	No	No	
PCMA	Si	Si	Si	No	No		
Libres de Contención	Mecanismo de resolución de colisión	ALOHA	Si	No	No	No	No
Libres de Contención	Mecanismo de asignación fija	TDMA	No	Si	No	No	No
		FDMA	No	Si	No	No	No
		FPRP	No	Si	No	No	No
		CDMA	No	Si	No	No	No

Híbridas	Mecanismo asignación dinámica	MCTRP	No	Si	No	No	No
		DPSM	No	Si	No	No	No
		MMAC	No	Si	No	No	Si
	Combinada	RR-ALOHA	Si	Si	Si	Si	No
		MS ALOHA	No	Si	Si	No	Si
		ADHOC MAC	Si	No	No	No	No
		A-ADHOC MAC	Si	Si	No	No	Si
		CSAP	No	Si	Si	No	No
		D-PRMA	No	Si	Si	Si	No
		D-TDMA	No	Si	No	No	Si
		R-ALOHA	Si	Si	No	No	Si
		STDMA	Si	Si	No	No	No
		DCAP	No	Si	No	No	No
		HRMA	No	Si	Si	No	Si
		CATA	No	Si	No	No	No
SRMA/PA	Si	Si	No	No	No		
DMMAC	No	Si	Si	Si	No		
MAMBA	No	Si	Si	Si	No		
No Combinada	CLUSTERING	No	Si	Si	Si	No	

Tabla 7. Resumen de las características de las Técnicas de Acceso para VANET. Por los Autores.

2.4. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

En el análisis de las técnicas de acceso que se utilizan en las redes VANET, es necesario identificar cuáles son los parámetros de desempeño o funcionamiento que pueden afectar el desempeño de la red.

La Figura 9 muestra los parámetros asociados a las técnicas de acceso y a la red, que pueden llegar a perturbar el desempeño de una red VANET durante la comunicación de datos.

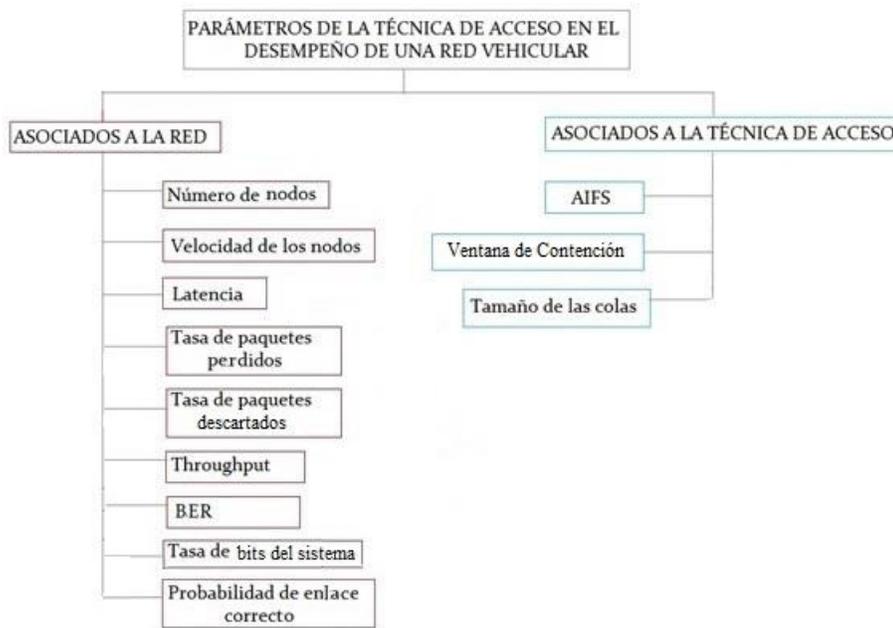


Figura 9. Parámetros de la técnica de acceso en el desempeño de VANET. Por los Autores.

2.4.1. Parámetros asociados a la red.

- **Número de nodos:** la cantidad total de nodos circulando por la red en un instante dado debe ser manejada de manera eficaz por la técnica de acceso, para evitar posibles problemas.
- **Velocidad de los nodos:** la velocidad de los nodos en una red vehicular debe ser manejable por la técnica de acceso, ya que impacta en mayor medida el tiempo de vida de los enlaces.
- **Latencia:** se define como la sumatoria de los retardos temporales de la red, es decir, el tiempo que tarda en recorrer una trama de datos desde el transmisor hasta el receptor.
- **Tasa de paquetes perdidos:** se define como la relación entre la cantidad de paquetes perdidos y el total de paquetes enviados entre dos nodos de la red. Generalmente, las principales causas de paquetes perdidos en una red son causados por desbordamiento de búfer o interferencia en los nodos.
- **Tasa de paquetes descartados:** Es la tasa de paquetes perdidos que va directamente relacionada con la capacidad de las colas de almacenar paquetes

antes de transmitirlos, por lo cual cuando un paquete llega y no alcanza a ser almacenado dentro de la cola queda descartado.

- **Throughput:** se define como el número total de paquetes recibidos correctamente por unidad de tiempo e indica la eficiencia de la capa MAC en una red. Cuando se mide el *throughput*, sólo se mide la parte de datos, la parte restante de gestión y de sobre encabezamiento no se tiene en cuenta.
- **BER:** es la relación existente entre la cantidad de bits errados y la totalidad de bits procesados por cada nodo.
- **Tasa de bits del sistema:** es la velocidad de intercambio de información, en bits por segundo, que se ejecuta en una transmisión en un tiempo establecido.
- **Probabilidad de enlace correcto:** se define como un parámetro que indica la probabilidad de que un nodo pueda acceder al medio y ejecutar su transmisión de una manera correcta.

2.4.2. Parámetros asociados a la técnica de acceso.

- **AIFS:** es el tiempo que tiene que esperar un nodo para realizar el procedimiento de *backoff* en caso de que el medio este ocupado.
- **Ventana de Contención:** es la encargada de establecer un rango de números, dentro del cual uno de esos dígitos se establece como pauta para el valor de *backoff*.
- **Tamaño de las colas:** es el tamaño en bits de capacidad de almacenamiento temporal que tiene cada cola antes de que un paquete acceda al medio.

Los parámetros mencionados anteriormente pueden afectar el desempeño de la comunicación de datos en una VANET.

En este capítulo se presentaron los conceptos básicos que permiten identificar las técnicas de acceso más utilizadas en redes vehiculares y los parámetros que podrían afectar su desempeño en un momento dado.

En el siguiente capítulo se detallan las técnicas de acceso CSMA/CA y ALOHA PURO para su posterior simulación, dado que son las técnicas más referenciadas por la literatura y las que más se utilizan en simulaciones de redes VANET.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS CSMA/CA Y ALOHA PURO

3.1. INTRODUCCIÓN

La naturaleza *ad-hoc* de una red vehicular, sus características y el número de transmisiones efectivas, son algunos de los factores que determinan la elección de una técnica de acceso adecuada para un ambiente real.

De las técnicas de acceso encontradas en la literatura, en el contexto de las redes vehiculares, sobresalen: CSMA/CA y ALOHA PURO, la primera de ellas por ser la más utilizada tanto en ambientes fijos como inalámbricos, la segunda, por servir de referencia para comparar procesos de desempeño en las redes. CSMA/CA y ALOHA PURO han sido utilizadas como base para la creación de nuevas técnicas, más robustas y con mejor desempeño [73,74]

Por tal razón, en este capítulo se describen las técnicas en mención en mayor detalle, ya que servirán como referencia para el análisis del impacto de las mismas en redes VANET.

3.1.1. Base teórica.

El intercambio de tramas entre nodos transmisores y receptores en una red VANET, se soporta fuertemente en el intercambio de mensajes denominados *beacon*, los cuales soportan el correcto funcionamiento de las técnicas de acceso; su descripción se realiza a continuación [74]:

- ✓ **Mensajes *Beacon*:** son un tipo especial de mensajes que contienen información acerca de la velocidad del vehículo, posición, descripción física del modelo de vehículo, descripción del rol del vehículo dentro del tráfico, el rumbo e historial de rutas entre otros. El mensaje Beacon tiene un tamaño de 200 bytes aproximadamente, dependiendo del estándar. La tasa de actualización con la que se envían estos mensajes por parte de los automóviles es de 1 a 20 Hz, ya que la información que contienen se vuelve rápidamente obsoleta, debido al constante movimiento y cambios de condiciones que experimentan los nodos.

Generalmente las situaciones que hacen que se generen nuevos mensajes *beacon* son:

- Cambios en la posición de los nodos mayores aproximadamente a 4 metros.
- Cambios en la velocidad de los nodos mayores a 0.5 m/s.
- Cambios en la dirección de los nodos, mayores a 4°.

La categoría de aplicaciones de seguridad, se implementa mediante el intercambio de los diferentes tipos de información de seguridad crítica y de mensajes *beacon*. Dependiendo del estándar ya sea de la ETSI o de la IEEE, tales mensajes también se

conocen como Mensajes de Seguridad Básica (*BSM, Basic Safety Message*) o Mensajes de Conocimiento Cooperativo (*CAM, Cooperative Awareness Message*).

- ✓ **Estructura de trama en la red VANET:** la Unidad de Información del nivel dos, acorde al modelo de referenica OSI, denominada trama, se constituye en el medio para acceder al canal de una manera equitativa y precisa, para que todos los usuarios tengan posibilidad de transmitir. La estructura genérica de la trama se muestra en la Figura 10, donde se observan los campos que hacen parte de la misma.

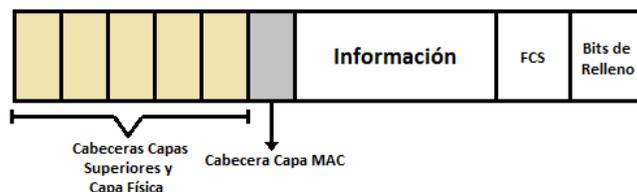


Figura 10. Estructura general de trama en una red VANET. Adaptada de [74].

Las cabeceras corresponden a la información de control procedente de niveles superiores, esta dependerá del modelo de arquitectura que tenga la red VANET, como por ejemplo en WAVE, la capa de Control de Enlace Lógico (*LLC, Logical Link Control*), la capa de Red y Transporte, etc.

El campo de Secuencia de Control de Trama (*FCS, Frame Control Sequence*), es el encargado de la detección de errores mediante un código de redundancia cíclica (*CRC, Redundancy Cyclic Chek*). El campo de "Bits de Relleno", se compone de bits adicionales que no portan información pero que son necesarios para obtener una trama de longitud mínima o una trama con número par de bytes.

En el campo Información se envían los diversos tipos de información (seguridad, comercial, de apoyo o de gestión del tráfico) manejados en una red vehicular.

La cabecera de la capa MAC para el estándar IEEE 802.11p está conformada por 7 campos, como se observa en la Figura 11.

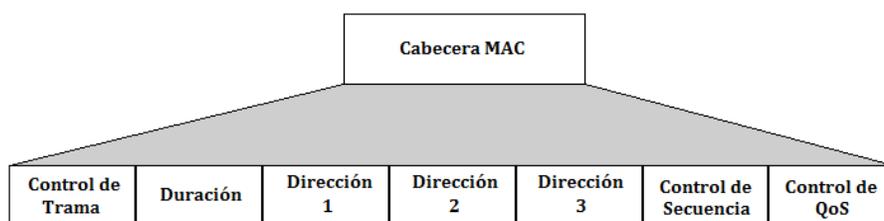


Figura 11. Cabecera MAC en IEEE 802.11p. Adaptada de [74].

El campo Control de Trama lleva la información de la técnica de acceso utilizada, también contiene información del tipo de trama, si es una trama completa o si está fragmentada. El campo Duración, contiene la información acerca de la duración de la trama. Los campos de direcciones corresponden al transmisor, al receptor, y la dirección de la red a la que pertenece. El campo de Control de Secuencia contiene la información encargada de realizar un seguimiento del paquete y finalmente el campo

de Control de Calidad de Servicio contiene la información acerca de la calidad del servicio, requerida para realizar una priorización de las tramas.

A continuación se describen las dos técnicas seleccionadas para el proceso de simulación y análisis de este trabajo de grado.

3.2. ALOHA PURO

La técnica de acceso ALOHA PURO o ALOHA NO RANURADO, se destaca por ser una de las más antiguas y pioneras en la comunicación de sistemas vía radio, con antecedentes desde la década del 70.

Su funcionamiento se caracteriza por su simplicidad y por el acceso de los nodos al canal compartido, independientemente de si dicho canal está ocupado o no [75,76]. Esta característica tiene como consecuencia la superposición parcial o completa de las tramas enviadas, generando una alta probabilidad de colisiones para una red que presente una carga pesada.

Lo anterior se debe a que ALOHA PURO no tiene capacidad de sincronización entre transmisiones de diferentes nodos, por lo que puede darse el caso de que otras transmisiones comiencen o terminen durante una transmisión que se encuentre en progreso y por consiguiente, la probabilidad de que ocurra una colisión es muy alta [77,78]. En una transmisión *unicast*, si la trama colisiona, se reintentará enviar la misma trama un tiempo posterior; en *broadcast*, si existe colisión se considera la trama como perdida sin posibilidad de retransmitirla. En las siguientes secciones se detalla el funcionamiento de esta técnica de acceso.

3.2.1. Mecanismos Internos de ALOHA PURO

En ALOHA PURO dentro de su algoritmo se pueden identificar tres mecanismos como base para su operación.

3.2.1.1. Confirmación de entrega Correcta

En transmisiones *unicast*, la confirmación de que la información se ha entregado correctamente consta de un mensaje Acuse de Recibo (ACK, *Acknowledgement*), de receptor a transmisor durante el tiempo de espera. La ejecución del mecanismo de *backoff* para esta técnica de acceso depende de la correcta recepción de los mensajes ACK.

Para transmisiones tipo *broadcast* el mecanismo de *Backoff* desaparece, ya que se genera en la red el problema “*tormenta de broadcast*”, la cual es una situación que se presenta en si persiste una entrega de confirmación ACK de receptor a transmisor. Al estar comunicándose todos los nodos entre sí, cuando un nodo envía un mensaje *broadcast*, como se ilustra en la Figura 12 (a), éste recibiría todas las confirmaciones de todos los posibles nodos receptores, provocando que algunos mensajes ACK lleguen al mismo tiempo al nodo transmisor, generando colisiones y mensajes perdidos en este

último, lo que conlleva a que no se pueda determinar quien recibió de manera correcta el mensaje y quien no.

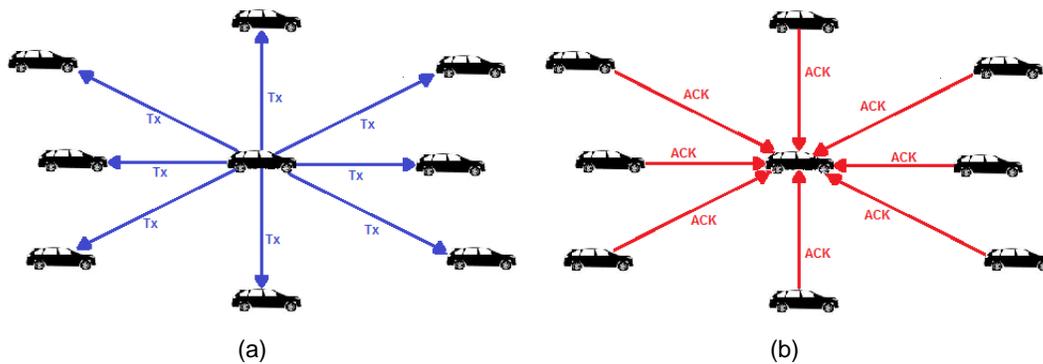


Figura 12. Tormenta *broadcast*. Por los autores.

3.2.1.2. Tiempo de Espera

Es un mecanismo que consiste en establecer un rango de valores de tiempos entre $(0, 2T_p]$, donde T_p es el tiempo de propagación de la información entre el transmisor y el receptor. Posteriormente se escoge de manera aleatoria un valor que determina el tiempo que el nodo transmisor debe esperar, para recibir la confirmación de la comunicación por parte del receptor.

3.2.1.3. Backoff

Es un contador de tiempo regresivo que se pone en marcha antes de enviar los paquetes de datos. Este mecanismo se basa en la escogencia de un valor R , de forma aleatoria dentro del rango $[0, 2^k - 1)$ donde k es un entero entre 0 y el número máximo de re-intentos de transmisión. El rango de posibles números enteros aleatorios, de los cuales se elige uno, está determinado por un algoritmo exponencial que lo incrementa a medida que aumentan los intentos de retransmisión.

Dada la ocurrencia de una colisión, se debe esperar un tiempo T_b , establecido por el producto entre R y el tiempo de *slot* para la retransmisión, que para el caso de la red VANET es de $13\mu s$, definido en el estándar IEEE 802.11p.

3.2.2. Funcionamiento

El funcionamiento de ALOHA PURO es el más sencillo de todas las técnicas de acceso existentes, debido a que a nivel general, en una transmisión *unicast*, los nodos envían las tramas cuando tienen algo que transmitir, sin percatarse del estado del medio de transmisión o de otros factores. La Figura 13 muestra la operación del algoritmo en mención.

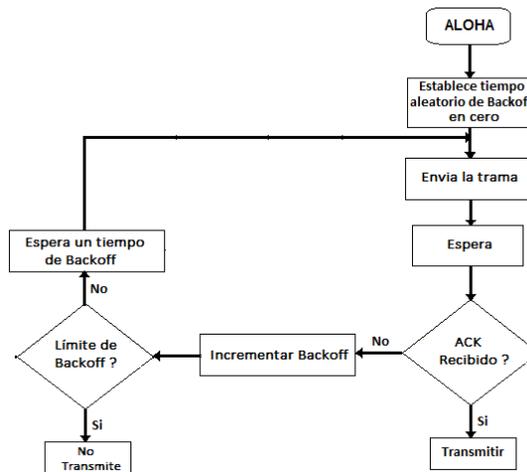


Figura 13. Diagrama de flujo ALOHA PURO, transmisión *unicast*. Adaptada de [79].

Un nodo transmite cada vez que tenga datos por enviar. Si el transmisor recibe un ACK por parte del receptor dentro de un tiempo de espera, entonces la trama ha sido recibida con éxito. En caso contrario, el nodo transmisor espera un tiempo aleatorio de *backoff* para evitar que más de una trama se transmita al mismo tiempo y retransmite una vez dicho tiempo haya expirado [80], como se observa en la Figura 14. Esto con el fin de completar el “periodo vulnerable” de una transmisión sin colisiones.

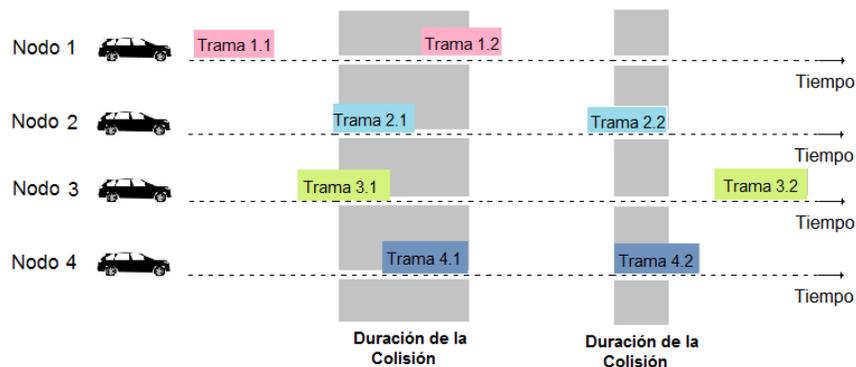


Figura 14. Ejemplo de colisión de ALOHA PURO. Por los Autores.

El Periodo vulnerable es un componente significativo de esta técnica de acceso y se determina como el tiempo en el que un nodo transmite una trama sin colisiones y genera una transmisión exitosa; lo anterior debido a que los otros nodos interferentes no deben tratar de transmitir durante el tiempo de transmisión del nodo. En ALOHA PURO, el periodo vulnerable equivale a *dos veces* el tiempo de transmisión de la trama (suponiendo un tamaño de trama constante) como se muestra en la Figura 15. Esto se debe a que un nodo puede transmitir libremente en cualquier instante, es decir que un nodo puede enviar en el instante en que otro nodo haya comenzado a transmitir o antes de que el nodo haya finalizado el envío de su información [81,82].

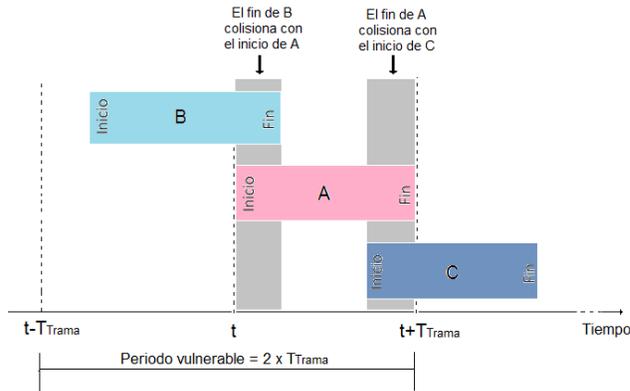


Figura 15. Periodo Vulnerable en ALOHA PURO. Adaptada de [79].

Aunque la complejidad en el funcionamiento de ALOHA PURO es baja, en transmisiones *broadcast* se simplifica aun más, debido a que se descartan algunos mecanismos de la mencionada técnica de acceso, consistiendo únicamente en acceder directamente al canal y transmitir cuando así lo requiera un usuario, lo que provoca la ocurrencia de colisiones. La Figura 16 muestra el esquema de operación del algoritmo de un nodo transmisor de un mensaje *beacon*, de manera *broadcast*.

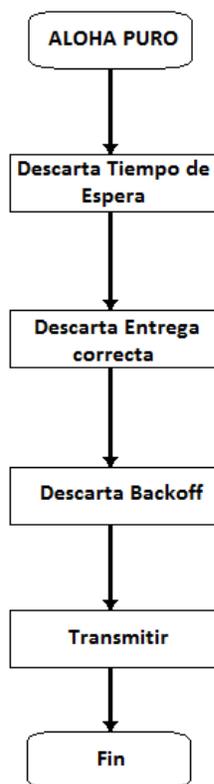


Figura 16. Diagrama de flujo ALOHA PURO, transmisión *broadcast*. Adaptada de [83].

La Figura 17 (a) y (b) muestran los diagramas de funcionamiento para esta técnica de acceso, para la transmisión *unicast* y *broadcast*.

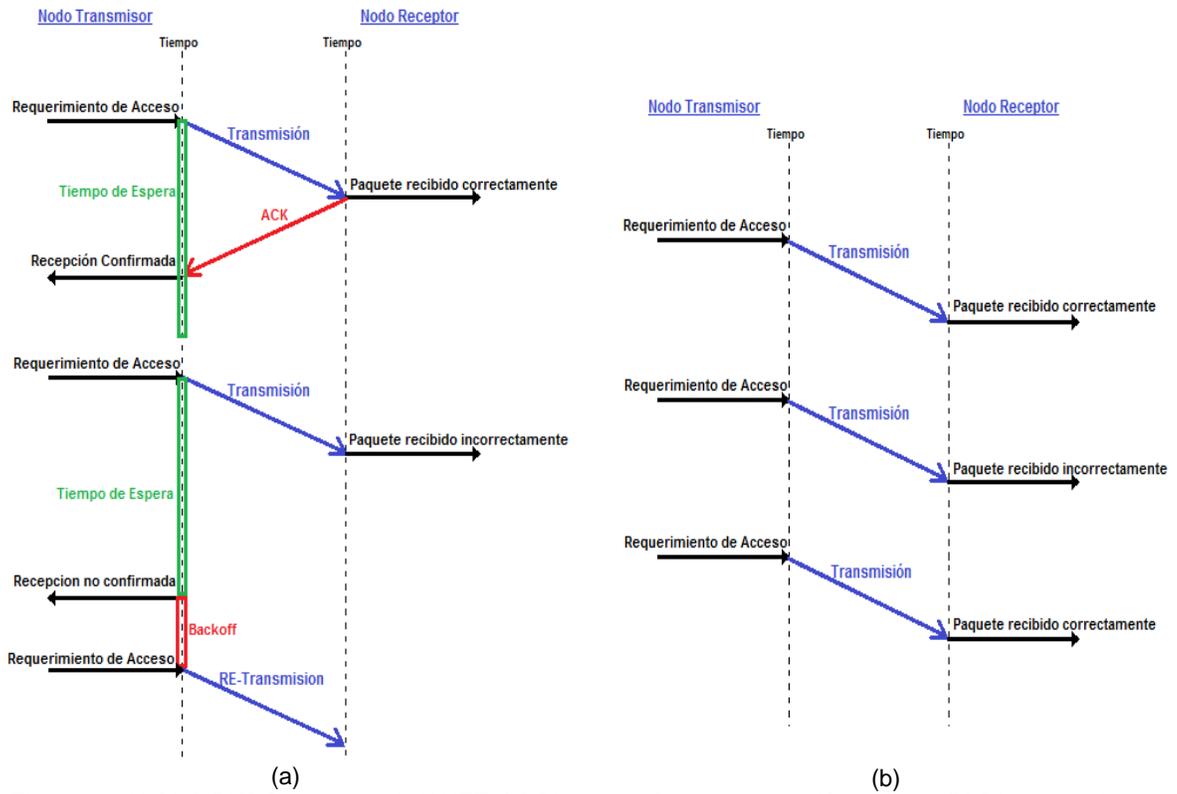


Figura 17. ALOHA PURO en una red VANET. (a) Diagrama de una transmisión *unicast*. (b) Diagrama de una transmisión *broadcast*. Por los Autores.

La Doctora Mariam Kaynia en su tesis de Doctorado [84] adecuó la capa MAC y la capa PHY de una red *ad hoc* inalámbrica, utilizando las técnicas ALOHA PURO y CSMA/CA, logrando mejorar su desempeño. Algunas de las ecuaciones y teoremas expuestos en [84] sirven para observar de forma cualitativa el desempeño de la probabilidad de enlace en un entorno vehicular.

3.2.3. Probabilidad de enlace correcto

La probabilidad de acceder y establecer un enlace correctamente para ALOHA PURO esta delimitada por:

$$P(\text{ALOHA PURO}) = P_{rt,u}^{N+1} \quad (3.1)$$

Donde, la probabilidad de retransmisión $P_{rt,u}$ es la solución a:

$$P_{rt,u} = 1 - \exp \left\{ -2\lambda \frac{1 - P_{rt,u}^{N+1}}{1 - P_{rt,u}} \pi s^2 \right\} \quad (3.2)$$

$$\lambda_{\text{ALOHA PURO}} = \lambda \frac{1 - P_{rt,u}^{N+1}}{1 - P_{rt,u}} \quad (3.3)$$

Mediante el cual se tiene que:

$$P_{rt,u} = 1 - e^{-2\lambda_{PURO}\pi s^2} \quad (3.4)$$

En las ecuaciones 3.3 y 3.4 N es el número de retransmisiones por cada trama, y λ es la densidad promedio de tramas por metro cuadrado respectivamente.

Por lo tanto una reducción significativa en la probabilidad de que haya un acceso y establecimiento correcto del enlace entre dos nodos ocurre cuando se incrementa la densidad de nodos y por lo tanto hay un transmisor diferente del correspondiente dentro de la vecindad de radio S en el tiempo $[0, T]$.

ALOHA PURO disminuye el retardo de propagación, sin embargo la principal desventaja de ésta técnica surge cuando se incrementa la densidad de usuarios. A medida que las colisiones se presentan con mayor frecuencia, aumenta el número de retransmisiones que, a su vez, incrementa la carga de tráfico ocasionando más colisiones. A causa de esto se genera una inestabilidad en el sistema que puede llegar a bloquear las transmisiones.

3.2.4. Ventajas y desventajas de ALOHA PURO en una red VANET [85,86,87]

La técnica de acceso ALOHA PURO presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Mejor rendimiento para una red con carga de tráfico liviana.
- Es la técnica de acceso más sencilla de implementar.
- El nivel de dificultad de su funcionamiento no es complejo.
- Existe retransmisión en *unicast* de los paquetes que experimentaron colisión.
- Espera un tiempo aleatorio para volver a transmitir.
- Retardo mínimo de acceso.

Desventajas:

- No posee sincronización.
- Mayor ocurrencia de colisiones.
- El nodo espera un acuse de recibo por el doble del tiempo que tarda la señal en recorrer la distancia.
- Los paquetes son transmitidos en tiempos completamente arbitrarios, no se verifica el estado del canal.
- En transmisiones tipo *broadcast* el transmisor se desentiende de la integridad de la información.

En general, la utilización de técnicas de acceso como ALOHA PURO presentan un bajo rendimiento cuando aumenta la carga de tráfico de datos o el número de nodos es elevado, este último caso es común en redes vehiculares [88].

3.3. CSMA/CA

En materia de redes vehiculares, para el estándar IEEE 802.11p se ha adaptado como esquema de gestión del canal, el Acceso al Canal Distribuido Mejorado (EDCA, *Enhanced*

Distributed Channel Access); en un principio establecido por el estándar IEEE 802.11e como una mejora del modo de operación de la Función de Control Distribuido (DCF, *Distributed Control Function*). EDCA basa su funcionamiento en la técnica de acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), junto con la priorización de datos, que se lleva a cabo mediante 4 categorías de acceso (AC, *Access Categories*), optimizando la QoS.

CSMA/CA es una técnica de acceso muy utilizada en redes tradicionales, adaptada también a protocolos de comunicación en redes inalámbricas convencionales como la 802.11. En este aparte se analiza su funcionamiento dentro del contexto de las comunicaciones VANET.

3.3.1. Mecanismos Internos de CSMA/CA

CSMA/CA posee cuatro mecanismos esenciales, los cuales están constituidos dentro de su algoritmo y dan forma a su esquema de funcionamiento.

3.3.1.1. Espacio entre tramas

Un mecanismo característico dentro de la técnica de acceso CSMA/CA son los Espacios Entre Trama (IFS, *Inter-Frame Spaces*), que representan intervalos de tiempo en los cuales el medio se indica como inactivo, antes de que un nodo pueda transmitir. Dicho IFS tiene diferente duración acorde a los diversos tipos de información que debe transportar, permitiendo realizar una priorización del tráfico para tramas de control o *beacons*. Dichos *beacons* se transmiten después de un corto espacio entre tramas, comparado con el espacio de tiempo de arbitraje con los que se transmiten las tramas regulares. Los tipos de tiempo entre tramas son:

- **SIFS** (*Short Inter Frame Space*, Espacio Corto Entre Tramas): es el tiempo entre tramas que pertenecen a una misma transmisión.
- **AIFS/DIFS** (*Arbitration Inter Frame Space*, Espacio de Arbitraje Entre Trama / *Distributed Inter Frame Space*, Espacio Distribuido Entre Tramas): es el tiempo que debe esperar un nodo para realizar el procedimiento de *backoff*, en caso de que el medio esté ocupado.

3.3.1.2. Ventana de Contención

El mecanismo de Ventana de Contención (CW, *Contention Window*), consiste en establecer un rango de números, dentro del cual uno de ellos se establece como pauta para el valor de *backoff*. El valor inicial de la ventana de contención es CW_{min} ; dicho valor se va incrementando periódicamente en caso de que, en intentos posteriores de retransmisión de la misma trama, el nodo vuelva a encontrar el medio ocupado. Este proceso se repite hasta que la ventana de contención alcance su valor CW_{max} como se muestra en la Figura 18.

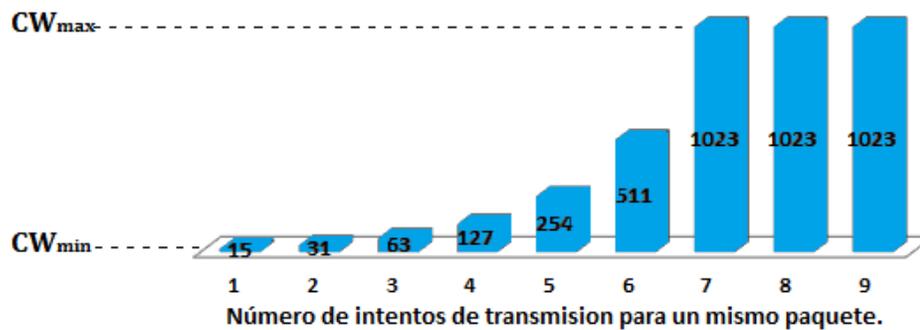


Figura 18. Incremento en la ventana de contención. Adaptada de [6].

Cuando se trabaja sobre una capa física que utiliza Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (*OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), se presentan valores específicos de $CW_{min} = 15$ y de $CW_{max} = 1023$.

3.3.1.3. *Backoff*

Por otra parte, el mecanismo de *backoff* es un conteo regresivo que se genera aleatoriamente en el rango entre 0 y el valor de la CW, con el fin de reducir la probabilidad de colisiones cuando existe una gran cantidad de usuarios queriendo acceder al medio; si el intento de acceder al canal es exitoso, el valor de la ventana va disminuyendo y, por lo tanto, el valor de *backoff* también, en caso contrario, al presentarse reintentos de transmisión, estos valores van aumentando. El procedimiento de *backoff* se puede resumir en los siguientes pasos:

- Expira el periodo de tiempo de escucha IFS y el medio se encuentra no ocupado.
- Se elige un número aleatoriamente dentro del rango $[0, CW]$.
- El número se multiplica por el tiempo de *slot*, determinado por la capa física en uso. Para el estándar IEEE 802.11p, el tiempo de *slot* es $T_{slot} = 13 \mu s$.
- El resultado de dicha multiplicación se considera como el tiempo de *backoff*.
- El conteo regresivo de *backoff* va disminuyendo siempre y cuando el medio se mantenga desocupado.
- Cuando el *backoff* llega a 0, se accede al canal y se transmite.

La variación del tiempo de *backoff* puede llegar a afectar negativamente una red vehicular, ya que en esta se presenta una gran cantidad de nodos y el tiempo de *backoff* de los mismos es pequeño.

3.3.1.4. *Apreciación clara del canal*

La técnica de evasión colisión de CSMA/CA, realiza la escucha del medio mediante el mecanismo de *Apreciación Clara del Canal (CCA, Clear Channel Assessment)*, cuyo funcionamiento es distinto para cada nodo de la red. Este mecanismo asegura que haya una baja interferencia en el área radio del receptor, limitando el número de transmisiones en dicha área y el número de tramas enviadas en esa zona. Para CSMA/CA en redes VANET, dicha apreciación se realiza de acuerdo a tres técnicas:

- Umbral de energía: cuando un nodo detecta un nivel de energía por encima del umbral de detección (DE, *Energy Detection*), reporta el medio como ocupado. En este caso el estado de ocupado del canal se basa en un nivel de interferencia.
- Detección de portadora: un nodo debe reportar al medio como ocupado cuando detecta una señal por parte de otro nodo compatible con el estándar que maneja; esto es, con las mismas características físicas como modulación, propagación, etc.
- Detección de portadora por encima del umbral DE: un nodo detecta el medio como ocupado cuando encuentra una señal compatible con el estándar que maneja un nivel por encima del umbral DE que tiene preestablecido.

3.3.2. Funcionamiento [83,89,90,91,92]

El funcionamiento de CSMA/CA puede describirse por dos premisas:

- ✓ 1^{er} Premisa: escuchar antes de hablar.

CSMA/CA primero escucha el medio durante un periodo de tiempo denominado AIFS. En caso de estar libre el nodo transmite, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Transmisión, canal libre, CSMA/CA. Por los autores.

- ✓ 2^{da} Premisa: proceso de espera si el medio está ocupado.

Si el medio está ocupado, el nodo que está dispuesto a transmitir pospone su transmisión durante un tiempo aleatorio. Una vez el medio se percibe libre, después de un tiempo AIFS, ejecuta el mecanismo de *backoff*. Posteriormente, el nodo debe esperar a que dicho tiempo de *backoff* expire para acceder al canal, con la condición de que este debe permanecer no ocupado o inactivo. El procedimiento anterior se ilustra en la Figura 20.



Figura 20. Transmisión, canal ocupado, CSMA/CA. Por los autores.

Una vez el nodo accede al medio, éste puede realizar su transmisión de dos maneras: *broadcast* y *unicast*. En transmisiones *unicast*, se realiza una transmisión ACK de receptor hacia transmisor con el fin de informar al nodo emisor que la comunicación fue exitosa. En transmisiones *broadcast* no se toma como referencia el ACK debido a que se

puede presentar una “tormenta de *broadcast*” para el nodo transmisor, recibiendo múltiples ACK’s por parte de todos los nodos que recibieron su mensaje.

En una red VANET, una trama se descarta bajo la técnica de acceso CSMA/CA si cumple dos circunstancias: si el contador de reintentos para acceder al canal excede el número máximo predefinido, y si se tiene otra trama para transmitir pero no se ha podido acceder al medio; en este caso se genera una nueva trama de la misma naturaleza y actualizada.

El acceso al canal sólo se realiza si la capa física no observa ninguna actividad en curso, mientras que la parte de evasión de colisiones se realiza mediante varios mecanismos como los IFS y el procedimiento de *backoff*. La capa física debe notificar el estado del canal a la capa MAC mediante el mecanismo CCA.

La Figura 21 (a) ilustra el diagrama de flujo de la operación del algoritmo de CSMA/CA, para un nodo transmisor de un mensaje *beacon* de manera *broadcast*.

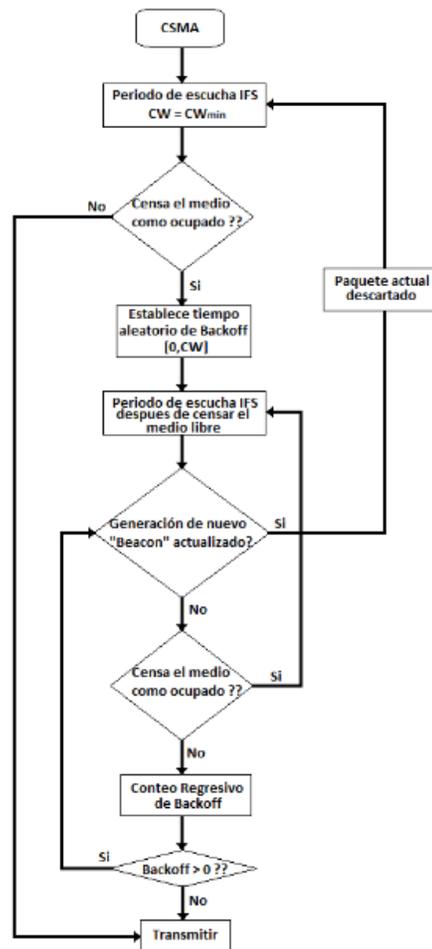


Figura 21. Diagrama de flujo CSMA/CA, transmisión *broadcast*. Adaptada de [83].

La Figura 22 muestra un diagrama de la técnica de acceso en cuestión, donde el transmisor ejecuta una transmisión *broadcast* de un mensaje *beacon*.

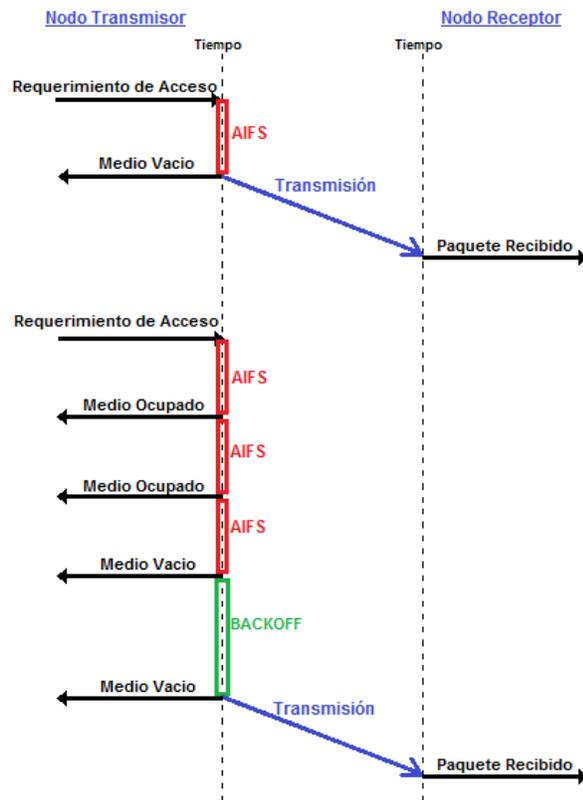


Figura 22. CSMA/CA en VANET. Diagrama en el tiempo de una transmisión *broadcast*. Por los Autores.

La técnica convencional es CSMA/CA, pero en el contexto VANET, dicha técnica de acceso trabaja juntoa EDCA, teniendo una mejora sobre su desempeño, como se explica a continuación.

3.3.3. CSMA/CA bajo EDCA en VANET

El funcionamiento de CSMA/CA dentro del contexto de las redes *ad hoc* vehiculares va directamente ligado con EDCA, el cual es un esquema de acceso al medio que identifica la información que un nodo desea transmitir. La identificación y tratamiento de la información se realiza a través de 4 tipos de tráfico correspondientes a 4 colas o *buffers*; cada uno de estos con una respectiva prioridad, dependiendo de la importancia y de la urgencia de su contenido. Diferentes valores de IFS y de CW se eligen para cada categoría de tráfico, generada por los diferentes tipos de aplicaciones en redes VANET, como se muestra en la Tabla 8.

CATEGORÍA DE TRÁFICO (CA)	DESCRIPCIÓN	PRIORIDAD	CW_{min}	CW_{max}	AIFS [μ S]
Voz (VO)	Representa el tráfico de voz. Retardo debe ser menor de 10 ms.	1	3	7	58
Video (VI)	Representa el tráfico de video. Retardo debe ser menor de 100 ms.	2	7	15	71
Best Effort (BE)	Representa el tráfico que debe transmitirse lo más rápido posible, después de ser atendido el de mayor prioridad.	3	15	1023	110
Background (BK)	Representado por todo el tráfico que no se encuentra incluido en ninguna de las otras tres categorías, siendo este denominado como tráfico de fondo o de relleno.	4	15	1023	149

Tabla 8. Tipos de tráfico por EDCA en IEEE 802.11p. Adaptada de [83].

En la Tabla 8 se observa que los tipos de tráfico de video y voz tienen una mayor prioridad con valores resultantes de *backoff* más bajos, por lo tanto el retardo en el acceso y retardo en la transmisión para este tipo de datos es menor en comparación con los demás.

En EDCA se presentan colisiones denominadas *propias*, la cuales ocurren cuando dos paquetes de un mismo nodo quieren acceder al medio en el mismo instante y que coinciden a pesar de pertenecer a colas diferentes. En este caso, se mantiene la trama de prioridad más alta para que acceda al medio, mientras que la otra experimenta el procedimiento de posponer el acceso, seguido del procedimiento de *backoff* como si hubiera ocurrido una colisión con otro nodo. Una representación gráfica del funcionamiento de EDCA se ve en la Figura 23.

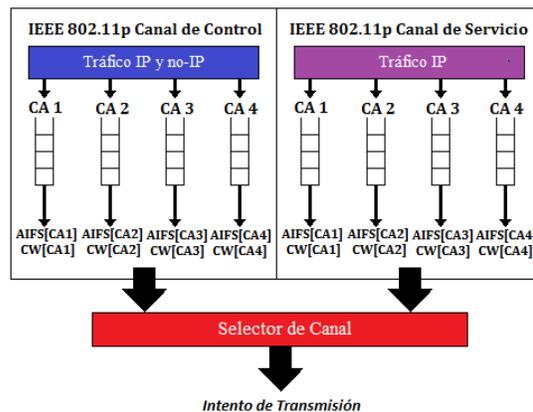


Figura 23. Esquema de EDCA en IEEE 802.11p. Adaptada de [91].

La Figura 24 muestra un ejemplo del funcionamiento de CSMA/CA dentro del marco de EDCA en una red VANET bajo el estándar IEEE 802.11p. El nodo 1 está finalizando su transmisión, el nodo 2 tiene una trama de tráfico de voz y el nodo 3 una de tráfico de *best effort*. Se observa que, cuando el nodo 1 termina su transmisión, los nodos 2 y 3 deben esperar, cada uno, cierto tiempo de AIFS para empezar a realizar cada uno su procedimiento de *backoff*. El nodo 2 acaba primero su tiempo de *backoff* y empieza a transmitir antes que el nodo 3; debido a que tiene una trama de mayor prioridad (VO). En el instante en que el nodo 3 acaba su tiempo AIFS y empieza su procedimiento de *backoff*, capta al medio como no ocupado o inactivo. Durante el *backoff* detecta que el nodo 2 empieza a transmitir, por lo que interrumpe su conteo regresivo de *backoff* y, una vez el nodo 2 acaba su transmisión, realiza un intento de retransmisión en el cual vuelve a esperar durante el AIFS y retoma un nuevo proceso de *backoff* para finalmente transmitir.

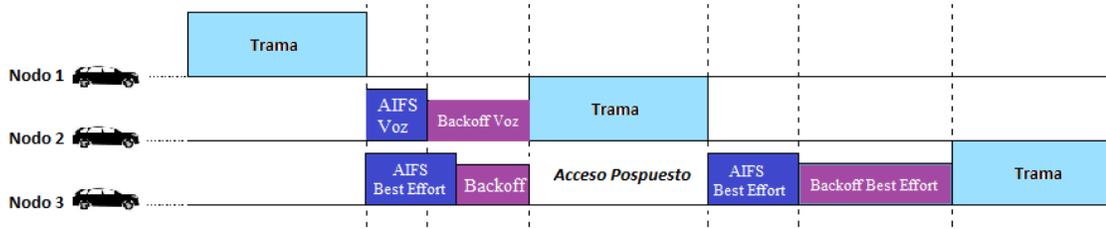


Figura 24. Ejemplo de CSMA/CA, bajo el concepto de EDCA en VANET. Adaptada de [91].

3.3.4. Probabilidad de enlace correcto

Según lo expuesto en [76], la probabilidad de acceder al medio y establecer un enlace correcto para un nodo con CSMA/CA en una red VANET, esta dada por:

$$P(CSMA_{TX}) = P_b^M + (1 - P_b^M) P_{rt1} P_{rt}^N \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.5, N es el número de retransmisiones por cada trama, M es el número de veces que se ejecuta el mecanismo de *backoff* por paquete y P_{rt1} es la probabilidad de que en el primer intento de retransmisión no se pueda establecer un enlace de manera correcta y que se presente un error en la transmisión.

$$P_{rt1} = P_{rx|transmisor} + (1 - P_{rx|transmisor}) P_{during} \quad (3.6)$$

Por otra parte P_b es la probabilidad de aplicar el mecanismo de *backoff*, $P_{rx|transmisor}$ es la probabilidad de que en el primer intento de comunicación no se exista un enlace correcto y llegue la trama con errores al receptor. También se tiene en cuenta a P_{rt} , que es la probabilidad de tener que hacer una retransmisión, que a su vez esta dada por:

$$P_{rt} = P_b + (1 - P_b) P_{during} \quad (3.7)$$

Finalmente en las ecuaciones 3.6 y 3.7, P_{during} es la probabilidad de que un paquete sea recibido con error durante un intento de una retransmisión y por lo tanto deba transmitirse nuevamente.

Acorde al soporte ecuacional, para redes de carga pesada donde se tengan que hacer varios intentos de retransmisión, la técnica de acceso CSMA/CA presenta desempeños poco aceptables. En las ecuaciones 3.5 y 3.6, se observa que el número de veces que un nodo reintentará acceder al medio, afecta la probabilidad de establecer un enlace correcto cuando este se encuentra ocupado reiteradamente.

3.3.5. Ventajas y Desventajas de CSMA/CA en una red VANET

Las ventajas más importantes de CSMA/CA son:

- ✓ A nivel general en una red de carga liviana (escenarios rurales para el caso de redes VANET), todos los nodos acceden al medio de una manera justa con un bajo retardo en el acceso al canal y con pocas colisiones en las transmisiones.
- ✓ A nivel particular en comparación con ALOHA PURO, su proceso de espera y por lo tanto el mecanismo de *backoff*, en una transmisión *unicast* es independiente del nodo receptor.

Por otra parte, las principales desventajas de CSMA/CA dada su naturaleza estocástica se presentan en redes con cargas pesadas, en donde la técnica de acceso se comporta de manera impredecible en el acceso al medio, incidiendo así en retardos no controlados en el acceso y bajos índices de escalabilidad.

Otras desventajas que presenta CSMA/CA en escenarios de redes vehiculares son:

- ✓ Retardo impredecible: no hay una garantía en el acceso al canal antes de un tiempo finito preestablecido, el cual no se encuentra determinado para un “peor caso”. Este tiempo siempre puede variar dependiendo de la situación y no tiene un valor máximo.
- ✓ Accesos simultáneos: puede darse el caso que dos nodos determinen el mismo tiempo de *backoff*, de esta manera, tratan de acceder al canal al mismo tiempo generando colisión y degradación en la recepción.
- ✓ Estados de bloqueo: pueden transcurrir periodos de tiempo prolongados en que un nodo escucha al medio como ocupado sin poder transmitir.

3.4. CSMA/CA y ALOHA PURO

Un resumen de las características de las técnicas de acceso analizadas a lo largo de este capítulo se presenta en la Tabla 9:

Característica	ALOHA PURO	CSMA/CA
Complejidad de implementación	Baja	Media
Complejidad de funcionamiento	Sencilla	Media
Retardo de acceso determinístico	No	No
Periodo de tiempo de acceso al canal	Menor	Mayor
Soporte de aplicaciones en tiempo real	Muy Bajo	Medio Bajo
Desempeño confiable	No	No
Peticion de requerimiento de Acceso	No	Si
¿Escucha el medio antes de enviar?	No	Si

Priorización de Tráfico	No	Si
Sincronización	No	No
Se generan ACK en <i>unicast</i>	Si	Si
Se generan ACK en <i>broadcast</i>	No	No
Procedimiento de <i>Backoff</i>	Si	Si
Dependencia <i>Backoff</i> del nodo receptor	Si	No
Procedimiento de reducción de colisiones	No	Si
Probabilidad de colisiones	Alta	Media Alta
¿Soporta cargas altas de tráfico?	No	No
Reintentos de transmisión (Re-transmisiones)	Si	Si
Presenta estados de Bloqueo al canal	Si	Si

Tabla 9. Comparación de CSMA/CA y ALOHA PURO en VANET. Por los Autores.

A lo largo de este capítulo se presentó una descripción de las técnicas CSMA/CA y ALOHA PURO, junto con las características de su funcionamiento, los cuales pueden ser configurados mediante código dentro del algoritmo de cada técnica de acceso.

En el siguiente capítulo se desarrolla el proceso de simulación y se analizan los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1. INTRODUCCIÓN

En una red *ad hoc* vehicular el ancho de banda es limitado y compartido por muchos usuarios lo que hace necesario que el acceso al canal sea efectivamente controlado, de tal manera que cada nodo pueda efectuar sus transmisiones sin demora.

Por esta razón, es relevante analizar las técnicas de acceso ALOHA y CSMA/CA para determinar de qué manera impactan en el desempeño de una comunicación de datos en una red VANET. En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación con el respectivo análisis de resultados.

4.2. SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para la selección de la herramienta de simulación, es fundamental que cumpla con los siguientes requisitos:

- ✓ Soporte para comunicaciones inalámbricas.
- ✓ Soporte del estándar IEEE 802.11p.
- ✓ Soporte de características de movilidad vehicular.
- ✓ Soporte de técnicas de acceso para una red vehicular.
- ✓ Generación de resultados que permitan obtener información para su análisis.

A continuación se presentan las principales categorías en las que se clasifican los simuladores usados en VANET.

- **Simuladores de tráfico**

Los simuladores de tráfico se encargan de modelar todo lo relacionado con el tráfico vehicular mediante la generación de mapas, implementación de accidentes, obstáculos, velocidad de automóviles y diferentes variables que hacen parte de un entorno vehicular; lo anterior con el fin de facilitar al usuario un entorno que sea lo más realista posible. La Tabla 10 presenta los principales simuladores de tráfico [93]:

Característica	Simulador		
	VanetMobiSim	SUMO	VISSIM
Licencia	Libre	Libre	Libre
Plataforma	Windows, Linux	Windows, Linux, MacOS	Multiplataforma
Lenguaje Escrito	Java	C++	Java

Tabla 10. Simuladores de tráfico. Por los Autores.

- **Simuladores de red**

Los simuladores de red son los encargados de recibir los datos generados por los simuladores de tráfico, para complementar el desarrollo de las comunicaciones la conexión inalámbrica, y permitir el análisis de la red desde diferentes escenarios. La Tabla 11 presenta sus principales características de los simuladores de red [94].

Característica	Simuladores					
	NC-TUNS	OPNET	OMNeT	NS-3	NS-2	GNS3
Licencia	Libre/comercial	Comercial	Libre	Libre	Libre	Libre/Comercial
Plataforma	Linux	Windows, Unix	Windows, Unix	Windows, Unix, MacOS	Windows, Unix, MacOS	Windows, Linux, MacOS
GUI	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo	Medio
Graficación de resultados	Aceptable	Buena	Aceptable	Aceptable	No tiene	Limitada
Tecnología soporta 802.11p	Medio	Medio	Alto	Medio	Alto	Bajo
Tráfico que permite modelar	Alto	Alto	Medio	Medio	Alto	Nulo

Tabla 11. Simuladores de red. Por los Autores.

- **Simuladores híbridos**

Los simuladores híbridos son los encargados de la integración de los simuladores de red con los simuladores de tráfico. En la Tabla 12 se presentan los principales simuladores híbridos [95,96].

Característica	Simulador		
	TRANS	MobiREAL	VEINS
Licencia	Libre	Libre/comercial	Libre
Plataforma	Multiplataforma	Multiplataforma	Multiplataforma
Lenguaje Escrito	Java	C++	C++

Tabla 12. Simuladores Híbridos. Por los Autores.

Con base en la información presentada en las tablas 10, 11 y 12, se concluyó que los simuladores más adecuados para implementar una red vehicular en este proyecto de grado son:

- ✓ **Simulador de tráfico:** SUMO permite adecuar el entorno con diferentes tipos de vehículos, modificar velocidad de los mismos, establecer número de nodos y proporcionar diversos escenarios. Con ayuda de la herramienta MOVE basada en Java® se facilita el uso al presentar interfaces gráficas y evitar la compilación manual de código. Además, la documentación existente facilita al aprendizaje del manejo de los simuladores.
- ✓ **Simulador de red:** OMNeT++ proporciona un análisis de resultados mejorado respecto a los otros simuladores, a pesar de que el lenguaje de programación es C++ y la gran mayoría de configuraciones de los parámetros de red se deben realizar mediante código, es el único que, permite el manejo de técnicas de acceso, razón primordial para la ejecución de este proyecto.

- ✓ **Simulador híbrido:** VEINS permite la comunicación bidireccional del simulador de tráfico SUMO y el simulador de red OMNeT++ en tiempo real, con el fin de visualizar los efectos que la comunicación entre vehículos tiene en la comunicación de datos.

4.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología de simulación adoptada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se basa en [97] [98] y consta de los pasos descritos a continuación:

- Definición de los escenarios y casos de simulación:** se definen los escenarios implementados con los casos de simulación y características respectivas.
- Definición de las características de los escenarios de simulación:** se presentan los parámetros técnicos definidos para la ejecución de las simulaciones.
- Ejecución de las pruebas de simulación:** se ejecutan las diversas simulaciones de los diversos escenarios.
- Análisis de resultados:** se presentan los resultados obtenidos por el simulador con su respectivo análisis.

4.3.1. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación

Los escenarios definidos para realizar las simulaciones presentan como variable principal el número de nodos presentes en la red. Los diferentes escenarios se muestran en la Tabla 13.

Escenarios de Simulación		
Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Red VANET con 45 vehículos ¹³	Red VANET con 80 vehículos	Red VANET con 130 vehículos ¹⁴

Tabla 13. Escenarios y casos de simulación.

Todas las simulaciones a realizar, para todos y cada uno de los escenarios, se efectuarán con los datos que se especifican en la Tabla 14.

Tasa de transferencia de datos [Mbps]	6	18
Velocidad de los nodos [m/s]	8.5	17

Tabla 14. Datos de simulación.

Para el caso de CSMA/CA, las simulaciones se realizarán con tamaño de cola equivalente en bits a dos veces el tamaño de un paquete de datos.

¹³Mínima cantidad de vehículos circulando en la zona de interés durante cinco minutos a las 10:00 am.

¹⁴Máxima cantidad de vehículos circulando en la zona de interés durante cinco minutos a las 06:30pm.

4.3.2. Definición de las características de los escenarios de simulación

En esta sección se describen las características definidas para los diferentes escenarios en relación al entorno de estudio y los parámetros técnicos establecidos para el desarrollo de la simulación.

- **Área de Estudio**

El área de estudio elegida para desplegar los escenarios de simulación corresponde a un sector de la ciudad de Popayán, específicamente entre la carrera 9ª con calle 63 Norte, sector de la glorieta de Bellavista. En dicho sector, el flujo de vehículos es elevado y cuenta con semáforos y vías que permiten el acceso a puntos importantes de la ciudad, además de agrupar a los vehículos mientras esperan el cambio de semáforo, lo que puede llegar a incidir en el desempeño de las técnicas de acceso elegidas. La Figura 25 muestra el detalle del sector de la ciudad elegido como área de estudio.



Figura 25. Área de simulación seleccionada. Foto de Google Earth.

El área escogida de la ciudad se adecuó al simulador de tráfico SUMO. La Figura 26 muestra el sector escogido implementado en el simulador.

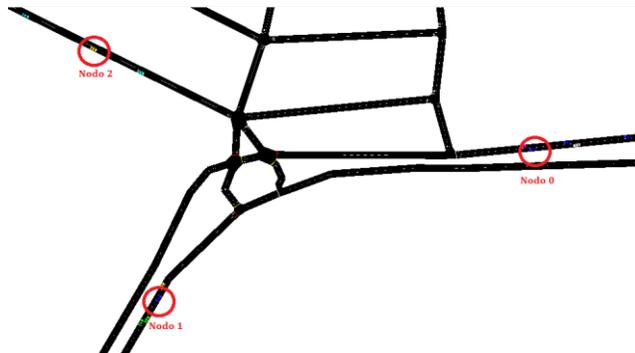


Figura 26. Área de simulación adaptada en SUMO.

- **Parámetros de los Escenarios de Simulación**

La Tabla 15 presenta los parámetros técnicos para los escenarios de simulación.

Parámetros de los Escenarios	
Tipo de comunicación	V2V
Dominio	<i>Ad Hoc</i>
Protocolo de Transporte	WSMP
Estándar	802.11p
Tipos de aplicación	De seguridad
Tipo de transmisión	<i>Broadcast</i>
<i>Payload</i> de los paquetes	256 y 2048 bits
Tamaño de los paquetes	558 y 2350 bits
Banda de Frecuencia	5.89 GHz
Canal de Operación	178
Potencia de Transmisión	200 mW (23 dBm)
Umbral de ruido Térmico	-110 dBm
Sensibilidad de los Receptores	-89 dBm
Modelo de Movilidad	<i>Krauss</i>
Modelo de Propagación	Espacio Libre, Desvanecimiento Simple

Tabla 15. Parámetros de los Escenarios. Por los Autores.

De la tabla 15 se destacan: el tipo de transmisión *broadcast* entre los automóviles, la velocidad máxima alcanzable por los nodos, el modelo de movilidad utilizado por éstos y el modelo de propagación para la realización de las simulaciones.

Los valores de velocidad de los nodos fueron adaptados con base en estudios realizados por la Secretaría de Tránsito Municipal de la ciudad de Popayán [99] y por el trabajo de campo realizado en el entorno de estudio.

El tipo de comunicación V2V fue escogido por la necesidad de interacción entre vehículos.

El protocolo de transporte que se usa es WSMP, porque es el estandarizado para mensajes en redes VANET.

El modelo de movilidad de Krauss fue escogido por ser uno de los más utilizados para simulaciones de redes VANET y porque caracteriza fielmente el movimiento de los vehículos sobre las vías.

Otros parámetros como el modelo de espacio libre y el modelo de desvanecimiento simple se usaron para simular posibles interferencias por objetos presentes en el área de simulación y evitar idealizar el medio de transmisión.

Finalmente, el tipo de transmisión *broadcast*, la potencia de transmisión, el umbral de ruido térmico y la sensibilidad de los receptores son valores que tiene implementados por defecto el simulador OMNeT++.

4.3.3. Ejecución de las simulaciones

Los nodos ciculan por el área de estudio durante un tiempo de 300 segundos, transmitiendo información *broadcast* en instantes específicos. El número de pruebas efectuadas es de una, en relación a que los resultados van a a ser determinísticos por el

mismo comportamiento del simulador. La fuente de tráfico utilizada corresponde a una aplicación de seguridad generando paquetes de 2350 bits y 558 bits, cada 0.05 segundos.

4.3.4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos están basados en la información entregada por OMNeT++ respecto a los parámetros descritos en la sección 4.3.2; con base en ellos se realiza el análisis tomando en cuenta tres nodos (**Nodo 0, Nodo 1 y Nodo 2**), cada uno con una ruta diferente, con el fin de obtener resultados a nivel microscópico (estudio particular de cada nodo) y tener resultados más acordes al desempeño real en una comunicación de datos sobre la VANET.

4.3.4.1. Escenario de simulación No.1: 45 Nodos

- Velocidades baja y alta: 8.5 y 17 m/s

La variación de la velocidad se realiza con el fin de observar cómo afecta parámetros como la **BER, throughput, latencia, probabilidad de enlace correcto y tasa de paquetes perdidos** en las técnicas ALOHA PURO y CSMA/CA.

- ✓ Tasas de transferencia de datos: 6 y 18 Mbps

La Figura 27 muestra los valores de BER contra tiempo para los tres nodos en estudio cuando circulan con velocidades baja y alta, y sobre un canal con tasa de datos de 6 Mbps.

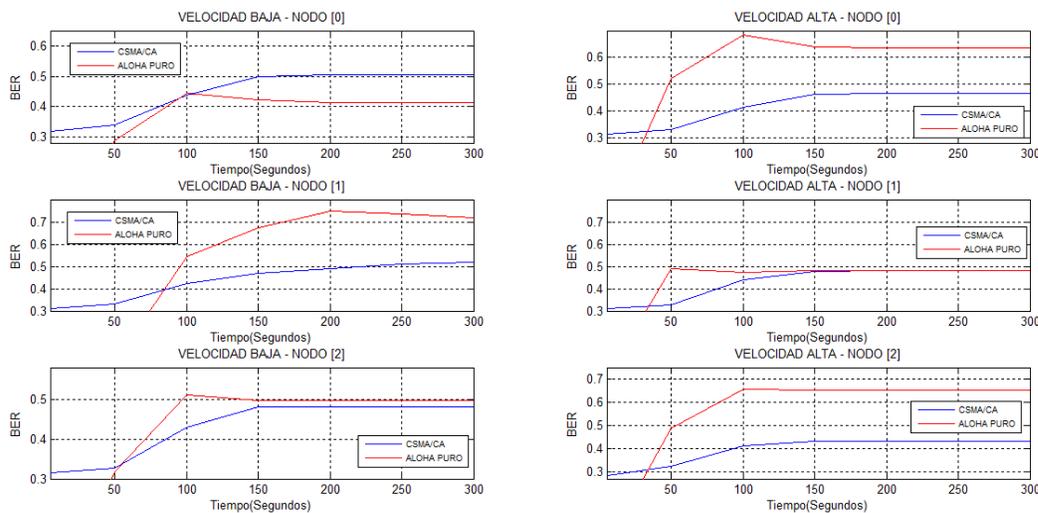


Figura 27. BER en el tiempo, escenario 1, tasa de 6 Mbps.

El cálculo de la BER se realizó con base en la ecuación 4.1:

$$BER = \frac{\# \text{ de Bits Errados}}{\# \text{ de Bits Errados} + \# \text{ de Bits Correctos}} \quad (4.1)$$

La figura 27 a nivel general muestra que la técnica CSMA/CA presenta un mejor comportamiento en BER que ALOHA PURO, en razón al funcionamiento de CSMA/CA con su capacidad para evitar colisiones e interferencia entre las comunicaciones de diferentes nodos.

La velocidad alta de los nodos en este caso impacta en mayor medida a ALOHA PURO, situación que se presenta por que existe mas probabilidad de que en un momento dado confluyan de forma más rápida con otros nodos en las vías y por el mismo comportamiento de ALOHA PURO

Por otra parte, la Figura 28 muestra la BER para la red VANET con una tasa de datos de 18 Mbps. Se observa que CSMA/CA presenta menores valores de BER en relación a ALOHA PURO.

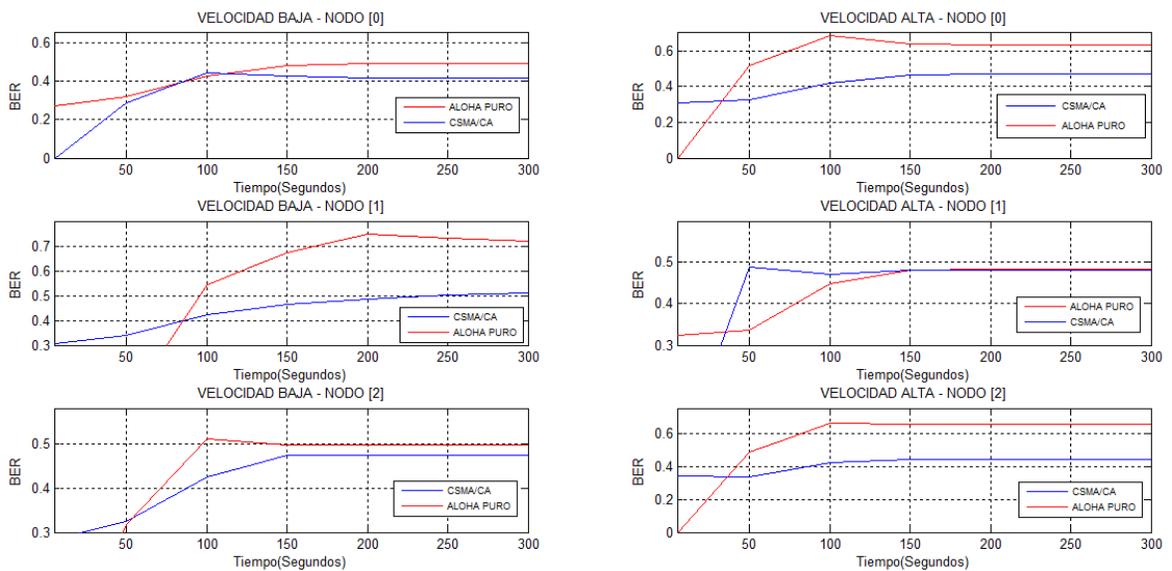


Figura 28. BER en el tiempo, escenario 1, tasa de 18 Mbps.

La Figura 29 muestra la latencia promedio de los nodos en estudio para las tasas de 6 y 18 Mbps. Esta se calculó en todas las simulaciones con base en la ecuación (4.2):

$$Latencia = Tiempo\ de\ Recepcion_{nodoRX} - Tiempo\ de\ Creación_{NodoTX} \quad (4.2)$$

A nivel general la técnica ALOHA PURO presenta una menor latencia en comparación a CSMA/CA, debido entre otras a la operación más simple de ALOHA PURO respecto a CSMA/CA, la cual ejecuta mecanismos de escucha del medio, algoritmo de *backoff* y uso de encolamiento, reflejándose en una mayor inversión de tiempo para completar una transmisión.

Se observa que la velocidad de los nodos no impacta la latencia, ya que los valores son muy similares en ambos casos, evidenciándose que depende de procesos internos que ejecuta cada técnica de acceso. La tasa de transferencia influye considerablemente para CSMA/CA, puesto al aumentar la tasa de datos (18 Mbps), se envía una mayor cantidad

de paquetes por unidad de tiempo, mejorando así la eficiencia de la red. Para la técnica ALOHA PURO se ilustra como los valores de latencia son constantes sin importar la tasa de transferencia o la velocidad de los nodos, esto se debe a que la cantidad de recepciones de paquetes por parte de los nodos no cambia así se envíen mas por unidad de tiempo.

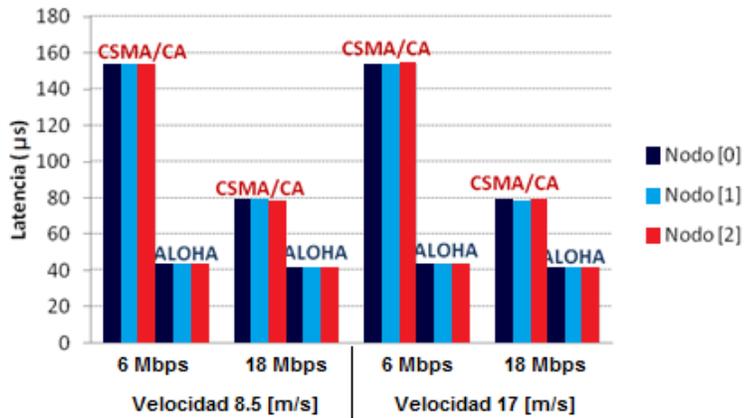


Figura 29. Latencia promedio, escenario 1.

Las Figuras 30 y 31 describen la probabilidad de enlace correcto que presentan los nodos en estudio para 6 Mbps, mientras que la Figura 32 hace lo mismo para una tasa de 18 Mbps. Este valor se calculó tomando en cuenta lo descrito en la ecuación (4.3):

$$Probabilidad = \frac{\# \text{ de transmisiones correctas}}{\# \text{ total de transmisiones}} \tag{4.3}$$

Se observa que, en general, CSMA/CA presenta una probabilidad más alta de que los nodos tengan un enlace estable para ambas tasas de datos, debido a la escucha previa que realiza del canal, con el fin de evitar colisiones y errores en la transmisión. Lo anterior se presenta porque, a medida que se incrementa el tiempo, los tres nodos bajo observación se ven rodeados de una mayor cantidad de autos. Entre mayor sea la presencia de usuarios, el medio va a estar cada vez más ocupado, haciendo más difícil poder acceder al medio y establecer una comunicación correcta.

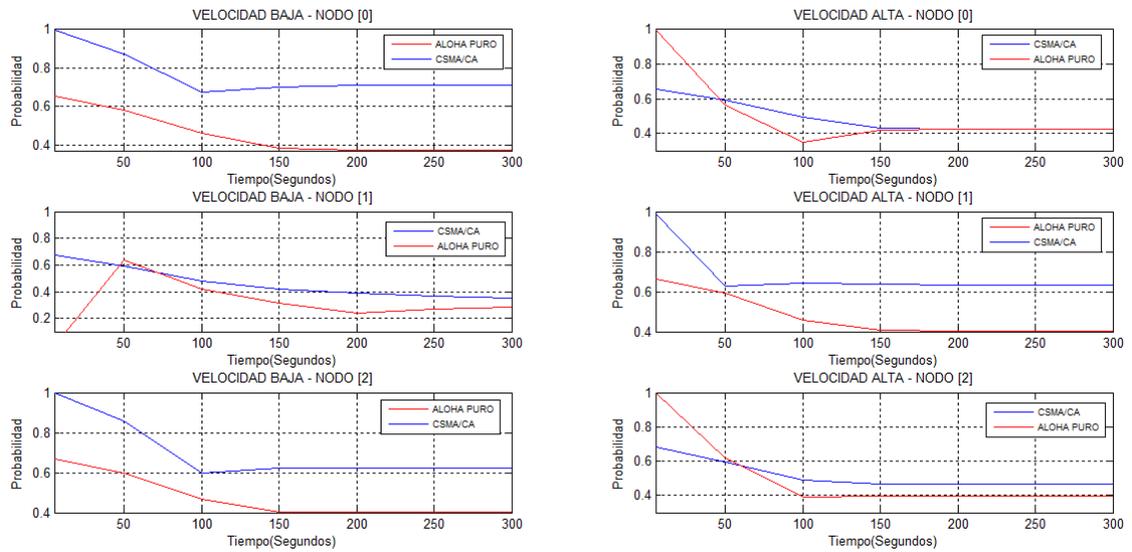


Figura 30. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 1, tasa de 6 Mbps.

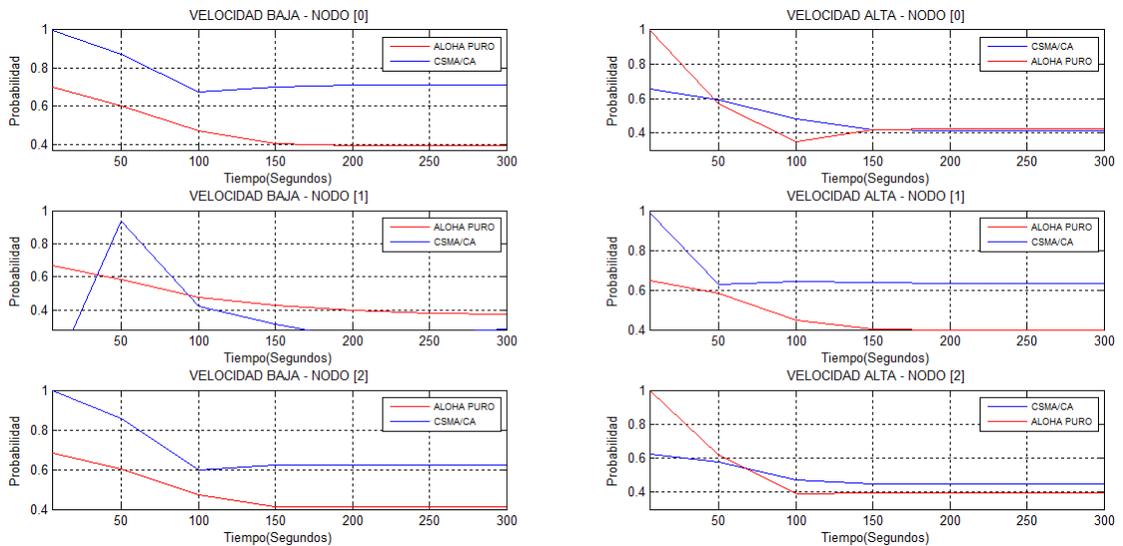


Figura 31. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 1, tasa de 18 Mbps.

La tasa de paquetes perdidos se calculó con base en la ecuación (4.4), la cual relaciona los paquetes perdidos con los paquetes totales procesados.

$$\text{Tasa de Paquetes Perdidos} = \frac{\text{Paquetes Perdidos}}{\text{Paquetes Recibidos} + \text{Paquetes Perdidos}} \quad (4.4)$$

La Figura 32 describe la tasa de paquetes perdidos para las dos tasas de bits en estudio. En ésta, CSMA/CA presenta a nivel general una menor cantidad de paquetes perdidos en comparación a ALOHA PURO, debido a los mecanismos anti-colisión. A nivel particular, para el nodo 1 la tasa de paquetes perdidos en ALOHA PURO se incrementa hasta perder la totalidad de ellos, cuando la tasa de transferencia es de 18 Mbps. Esto se da

principalmente por la ruta establecida para dicho nodo, siendo más afectado por el desvanecimiento producido por los obstáculos que circundan el área de estudio.

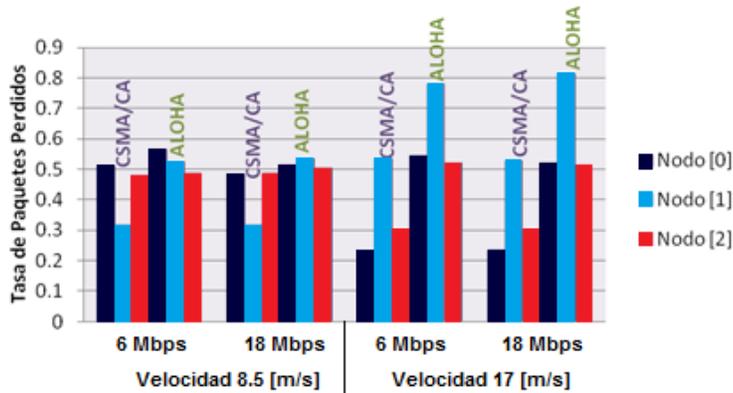


Figura 32. Tasa promedio de paquetes perdidos, escenario 1.

Finalmente, las Figuras 33 y 34 representan el *throughput* instantáneo para tasas de 6 y 18 Mbps respectivamente. El cálculo del *throughput* para todas las simulaciones se realizó con base en la ecuación (4.5), que relaciona la cantidad de paquetes recibidos correctamente con su respectivo tamaño y el tiempo de simulación transcurrido.

$$Throughput = \frac{[Paquetes Recibidos Correctamente] \times [Tamaño del paquete]}{Tiempo de simulación} \quad (4.5)$$

Para ambas tasas de datos a nivel general los valores de *throughput* de CSMA/CA, son mayores que los de ALOHA PURO, esto en razón a la cantidad de recepciones correctas que se obtuvieron para CSMA/CA, debido a su funcionamiento basado en la evasión de colisiones. El *throughput* se ve fuertemente afectado en ALOHA PURO debido a la cantidad de colisiones que presenta en sus comunicaciones, dando como resultado una cantidad mucho menor de paquetes recibidos correctamente.

Entre más nodos estén presentes habrá un mayor volumen de información y, por ende, un mayor rango de comunicación debido a la opción de la técnica multi-salto.

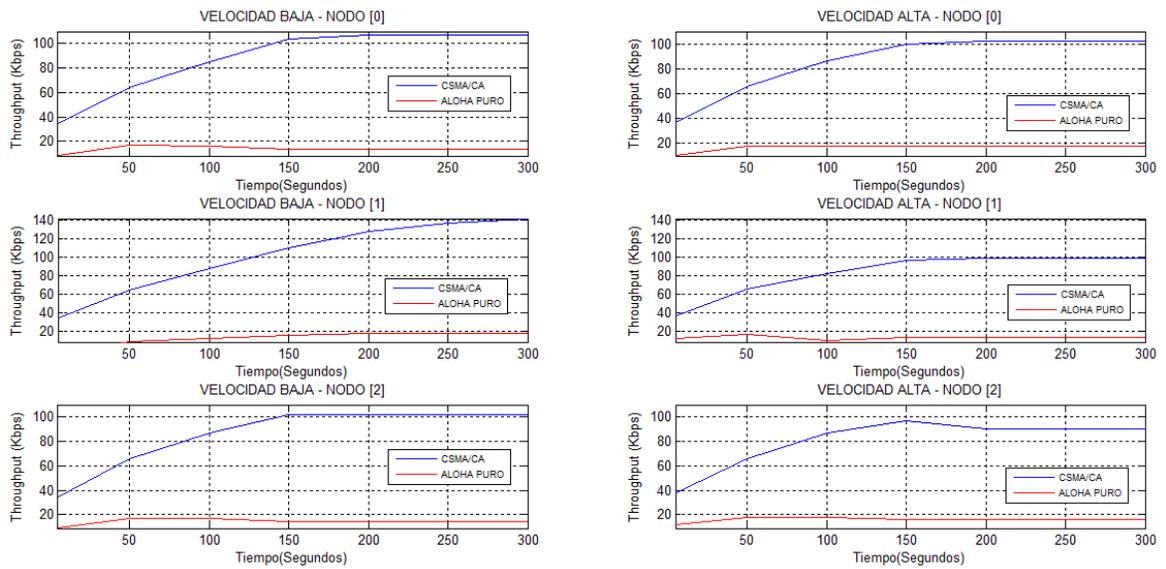


Figura 33. Throughput instantáneo, escenario 1, tasa de 6 Mbps.

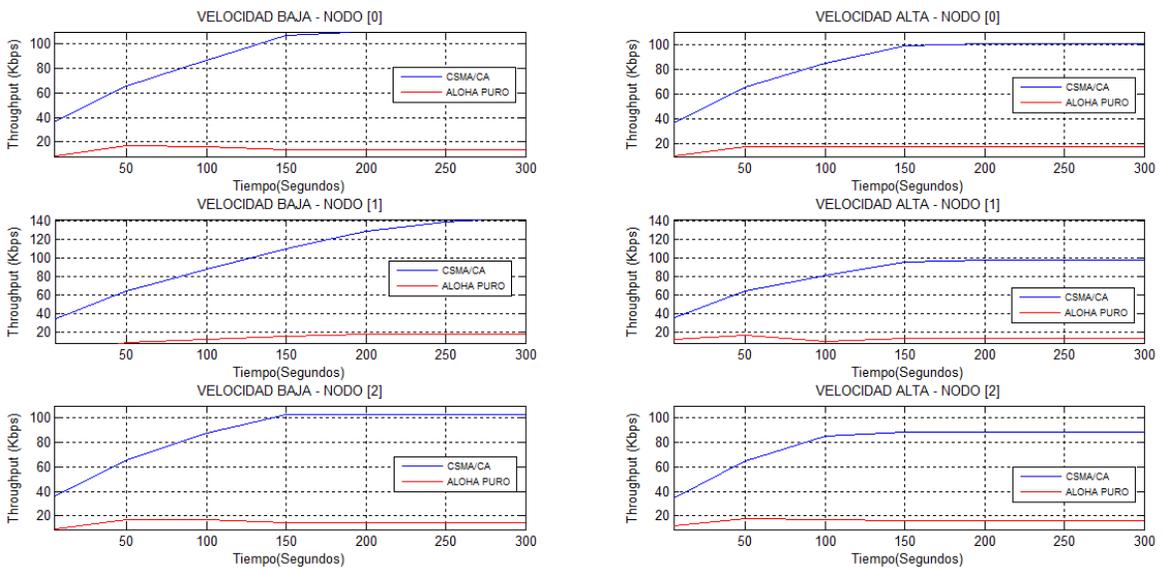


Figura 34. Throughput instantáneo, escenario 1, tasa de 18 Mbps.

4.3.4.2. Escenario de simulación No. 2: 80 Nodos

- Velocidades baja y alta : 8.5 y 17 m/s

Para el análisis de este escenario se tuvo en cuenta los parámetros de desempeño definidos previamente en la sección 4.3.4.1.

- ✓ Tasa de transferencia de datos: 6 y 18 Mbps

Las Figuras 35 y 36 describen el valor de BER en el tiempo para 6 y 18 Mbps respectivamente; a nivel general se observan una mejor BER en la comunicación de CSMA/CA en comparación a ALOHA PURO para casi todos los instantes de tiempo. Lo anterior básicamente porque CSMA/CA determina el momento adecuado para acceder al medio y ejecutar la transmisión, permitiendo que la comunicación no se traslape con otras como en el caso de ALOHA PURO.

Haciendo una comparación de éstos datos con los obtenidos en el escenario 1, se observa que el incremento en el número de usuarios afecta negativamente el valor de BER, al presentar, en este caso, valores más elevados que los de las Figuras 27 y 28.

Por otra parte, se puede apreciar que en algunos nodos los resultados de BER tienden a ser similares para las dos técnicas de acceso, esto debido a la congestión de la ruta que lleva cada uno y la distancia con sus nodos vecinos.

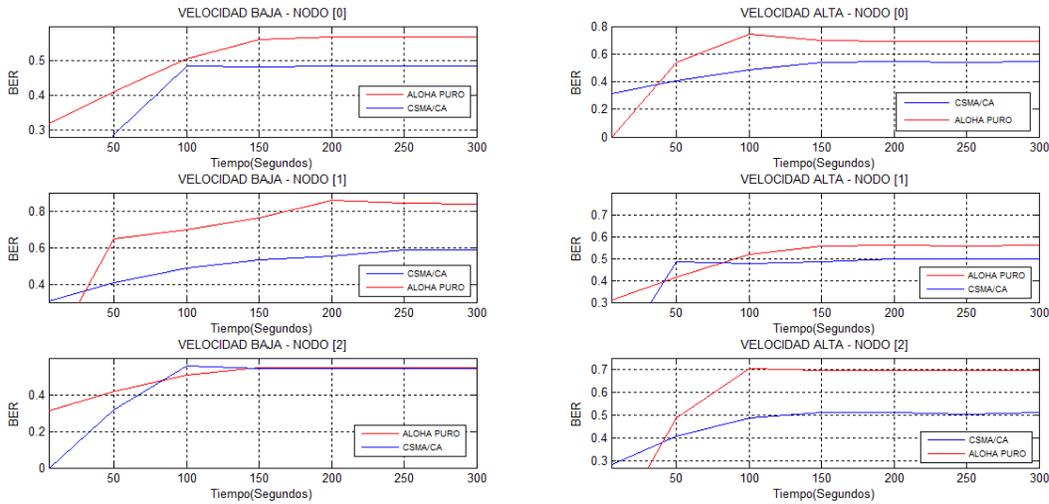


Figura 35. BER en el tiempo, escenario 2, tasa de 6 Mbps.

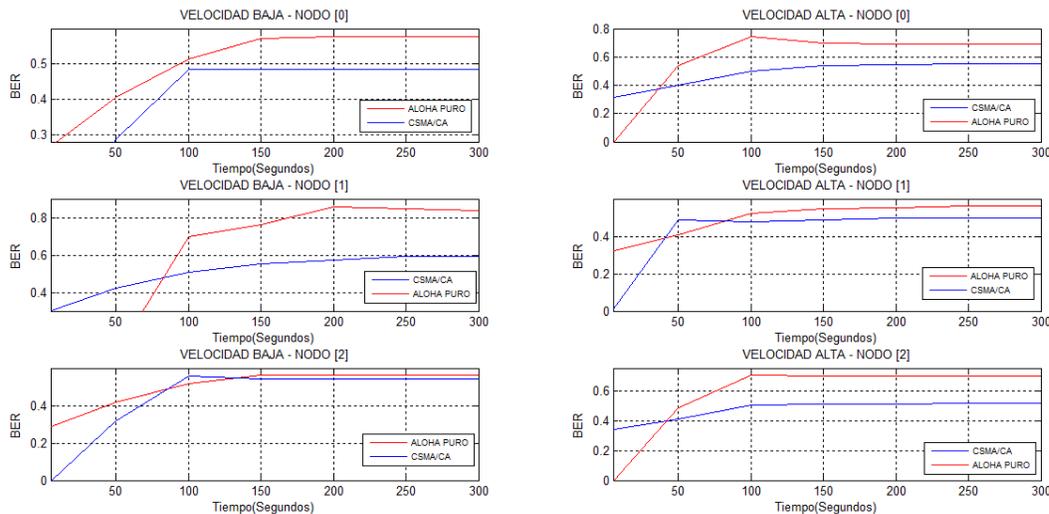


Figura 36. BER en el tiempo, escenario 2, tasa de 18 Mbps.

La Figura 37 ilustra la latencia promedio para las tasas de transferencia de 6 y 18 Mbps. A nivel general se observa la tendencia de una menor latencia para ALOHA PURO en comparación con CSMA/CA, debido a que esta última técnica gasta más tiempo realizando todos los mecanismos en los que se basa su funcionamiento.

Realizando una comparación con la figura de latencia del escenario 1, se observa una gran similitud en los valores, por lo que el número de usuarios, para este caso no es una variable que afecte la latencia de los paquetes en la red VANET.

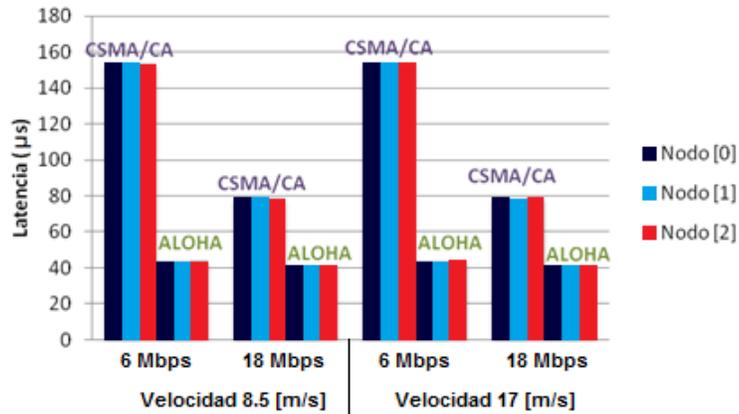


Figura 37. Latencia promedio, escenario 2.

En el caso de la probabilidad de enlace correcto, en las Figuras 38 y 39 se muestran los valores instantáneos para para 6 y 18 Mbps respectivamente. CSMA/CA demuestra su superioridad, con la que se obtiene en simulación un mayor porcentaje de enlaces correctos que ALOHA PURO, debido a la ventaja que le proporciona contar con mecanismo de espera y de escucha del canal. Por otra parte también se observa que el número de usuarios influye relativamente poco en la probabilidad de enlace correcto.

A nivel particular, el factor velocidad de los nodos, influye en los nodos 0 y 2 más que en el nodo 1, aproximando las curvas de ALOHA PURO y CSMA/CA, lo que sugiere que las condiciones cambiantes, incrementan la dificultad de establecimiento de una comunicación adecuada con sus nodos vecinos.

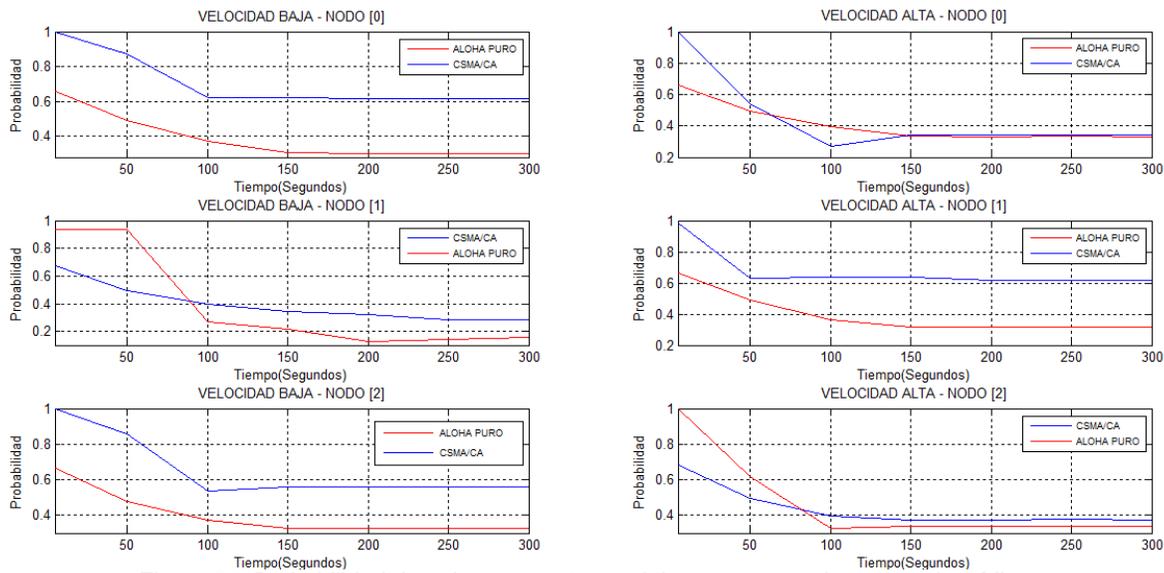


Figura 38. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 2, tasa de 6 Mbps.

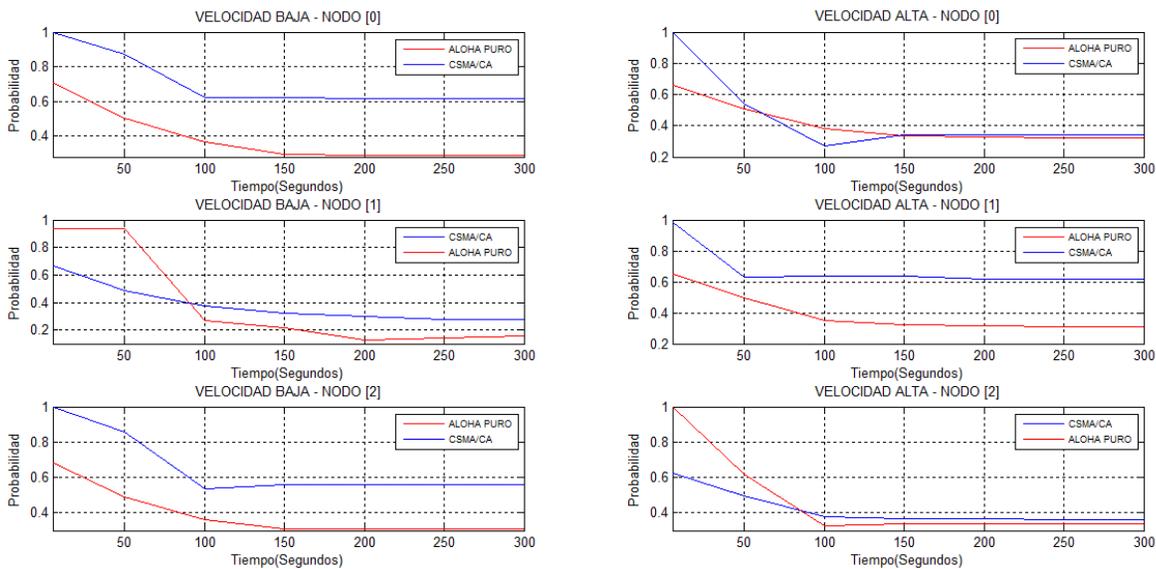


Figura 39. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 2, tasa de 18 Mbps.

Respecto a la tasa de paquetes perdidos, la Figura 40 muestra su comportamiento para 6 y 18 Mbps. CSMA/CA, dada su esencia de evasión de colisiones, presenta una menor cantidad de paquetes perdidos que ALOHA PURO, para ambas tasas de transferencia de datos

En relación a la gráfica de paquetes perdidos del escenario 1, se presentan ciertas similitudes entre resultados de éstos escenarios, evidenciándose que la cantidad de paquetes que se pierden en una comunicación se aumenta como consecuencia del incremento en el número de nodos, de 45 a 80. El incremento en la tasa de paquetes perdidos se da porque se tiene que compartir el medio de comunicación entre un mayor número de usuarios en la red, resultando como consecuencia una mayor cantidad de

colisiones para ALOHA PURO y una mayor cantidad de paquetes descartados para CSMA/CA, entre otras.

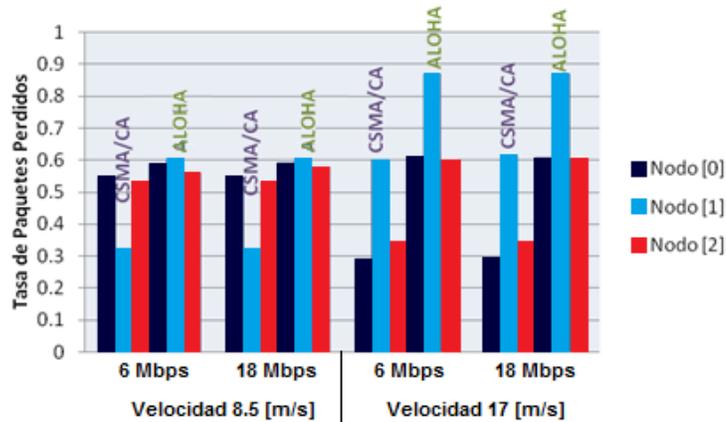


Figura 40. Tasa promedio de paquetes perdidos, escenario 2.

Para finalizar el análisis de este escenario, las Figuras 41 y 42 presentan el *throughput* para 6 y 18 Mbps respectivamente. Se observa que los resultados de CSMA/CA alcanzan mayores valores que ALOHA PURO, puesto que la cantidad de paquetes que llegan correctamente a sus destinos es mayor cuando se utiliza la técnica CSMA/CA, con su mecanismo de escucha del canal.

Se observa cómo el aumento en la velocidad de los nodos afecta de manera significativa el valor instantáneo de *throughput*. Para este caso entre mayor sea la velocidad menor es el valor del *throughput*, puesto que el incremento en la velocidad causa una situación de inestabilidad en la conexión y en su proceso de establecimiento, reflejándose en un decremento en la cantidad de paquetes recibidos correctamente.

Respecto a la tasa de transferencia de datos se evidencia un pequeño incremento en los valores máximos alcanzados de *throughput*, puesto que a una mayor tasa, el número de datos enviados por unidad de tiempo será mayor.

Realizando una comparación de éstos valores con los de las gráficas de *throughput* del escenario 1 (Figuras 33 y 34), puede verse cómo el aumento en el número de usuarios influye positivamente en el *throughput* total sobre cada nodo analizado; esto se da principalmente por la naturaleza broadcast de las comunicaciones, que al presentarse un mayor número de nodos, habrá un mayor volumen de tráfico.

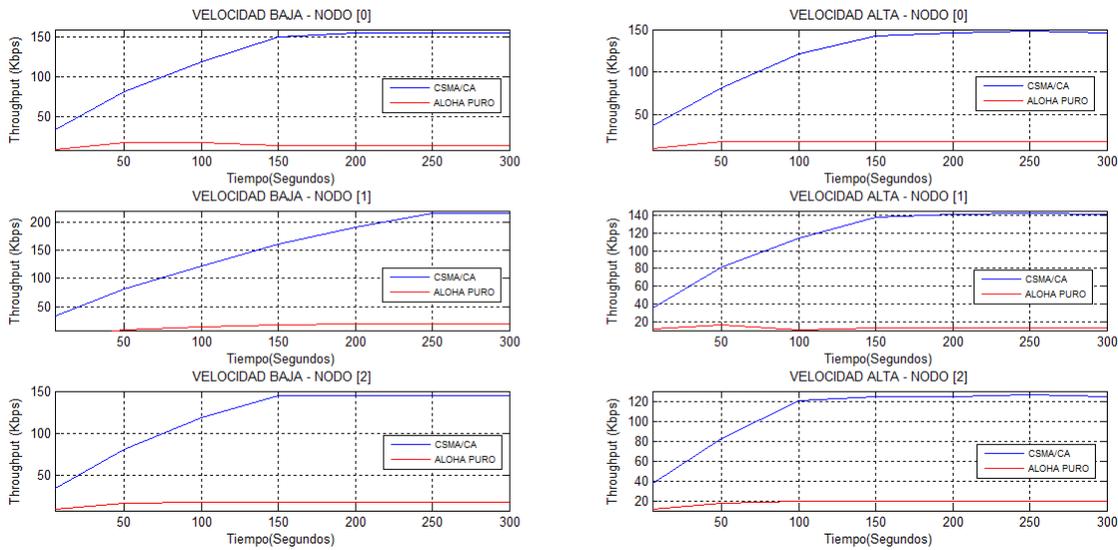


Figura 41. *Throughput* instantáneo, escenario 2, tasa de 6 Mbps.

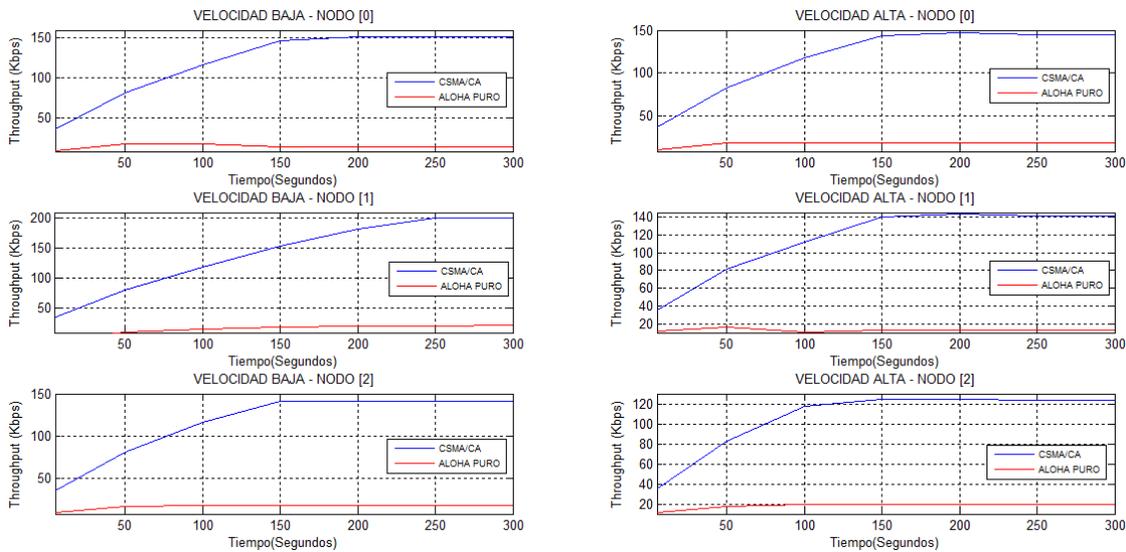


Figura 42. *Throughput* instantáneo, escenario 2, tasa de 18 Mbps.

4.3.4.3. Escenario de simulación No. 3: 130 Nodos.

- Velocidades baja y alta: 8.5 y 17 m/s

Al igual que los escenarios, para este análisis se tomaron en cuenta los parámetros de desempeño previamente definidos en 4.3.4.1.

- ✓ Tasa de transferencia de datos: 6 y 18 Mbps

Las Figuras 43 y 44 presentan la BER para las tasas de transferencia de 6 y 18 Mbps respectivamente. Se observa que ALOHA PURO presenta una mayor cantidad de errores

en comparación a CSMA/CA, dado que el número de usuarios hace que se incremente la demanda del canal, por lo cual para una técnica de acceso primitiva como ALOHA PURO hace que se traslapen comunicaciones y colisionen paquetes de datos con mayor frecuencia, ocasionándose una mayor cantidad de errores.

Realizando una comparación con los valores de BER de los escenarios 1 y 2, con este escenario, la diferencia entre los valores para ALOHA PURO y CSMA/CA es menor, debido a la gran cantidad de usuarios en la red (130 para este caso).

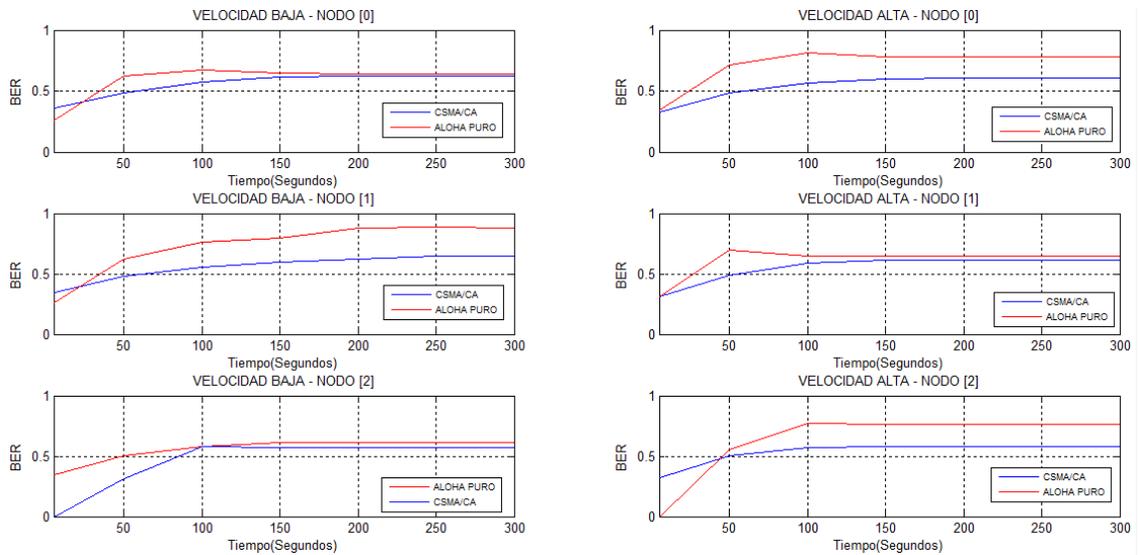


Figura 43. BER en el tiempo, escenario 3, tasa de 6 Mbps.

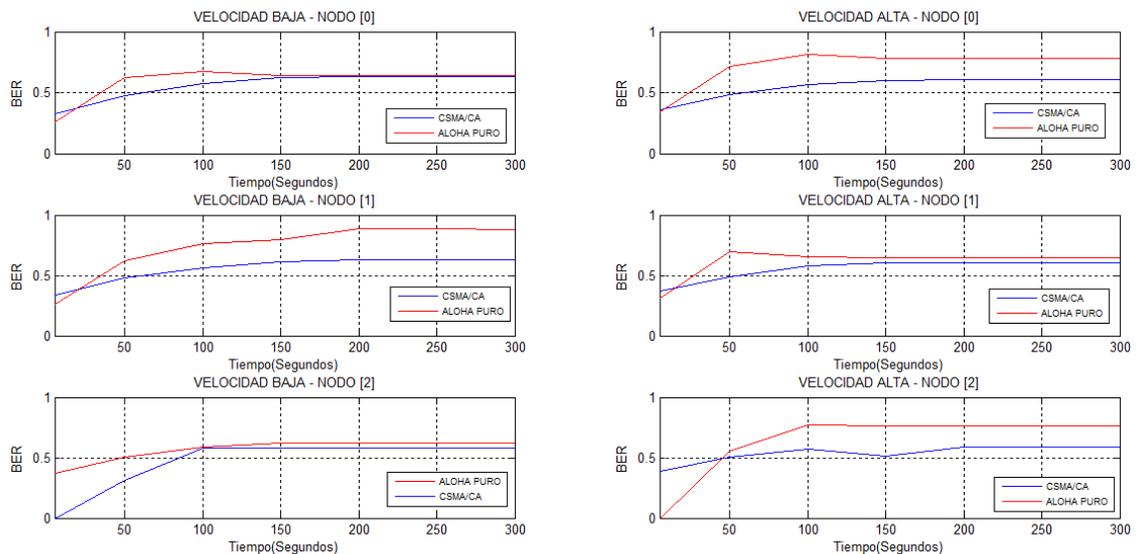


Figura 44. BER en el tiempo, escenario 3, tasa de 18 Mbps.

La Figura 45 describe la latencia promedio para tasas de 6 y 18 Mbps respectivamente. A nivel general se aprecia como la latencia es mayor para CSMA/CA, que para ALOHA PURO, básicamente por los diferentes procesos que tiene que realizar CSMA/CA antes de efectuar una transmisión y en este caso debido al mayor volumen de usuarios.

La velocidad de los nodos se considera que no influye en el valor de la latencia, puesto que este parámetro de desempeño asociado a la red depende de los procesos internos que posea cada técnica de acceso dentro de su funcionamiento.

En contraste, la tasa de transferencia de datos si influye considerablemente, ya que para una tasa de 6 Mbps la diferencia entre una técnica de acceso y la otra es significativamente grande, de esta manera CSMA/CA invierte mas tiempo que ALOHA PURO. Para una tasa de 18 Mbps dicha diferencia se reduce notoriamente. Lo anterior se debe a que entre mayor sea la tasa de transferencia de datos, se puede enviar una mayor cantidad de paquetes por segundo, reflejándose esto en menos tiempo para enviar y recibir los mismos.

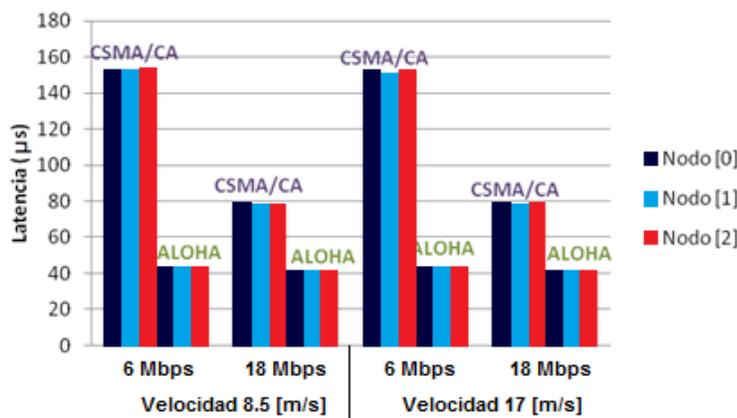


Figura 45. Latencia promedio, escenario 3.

En las Figuras 46 y 47 se muestran los valores instantáneos de la probabilidad de enlace correcto para las tasas de transferencia de 6 y 18 Mbps respectivamente.

Se observa un mejor comportamiento por parte de CSMA/CA en relación a ALOHA PURO, cuando los nodos tienen una velocidad baja y con mínima en caso contrario. De esta manera se evidencia que la velocidad con la que se mueven los nodos afecta considerablemente a CSMA/CA y no tanto a ALOHA PURO. Lo anterior se debe a que el tiempo en el que cambian las condiciones para un nodo a veces es menor que el tiempo que requiere CSMA/CA en escuchar el medio y establecer el acceso en el momento de acceder al medio y ejecutarse una transmisión de manera correcta.

Realizando una comparación con, las curvas de probabilidad de enlace correcto del escenario 1, los valores picos de probabilidad que presentan ambas técnicas de acceso se reducen. De esta manera se evidencia que el número de nodos influye en la probabilidad de establecer una comunicación exitosa, porque entre mas demandas de transmisión haya, la posibilidad de acceder al medio y establecer correctamente una transmisión se hace más compleja.

A nivel particular se observa como se mantiene la tendencia del escenario 2, para la probabilidad de enlace correcto, la cual indica que éste nodo es uno de los que poseen

una mayor probabilidad de establecer un enlace correcto con sus otros nodos vecinos, básicamente por la ruta y entorno que posee durante la simulación.

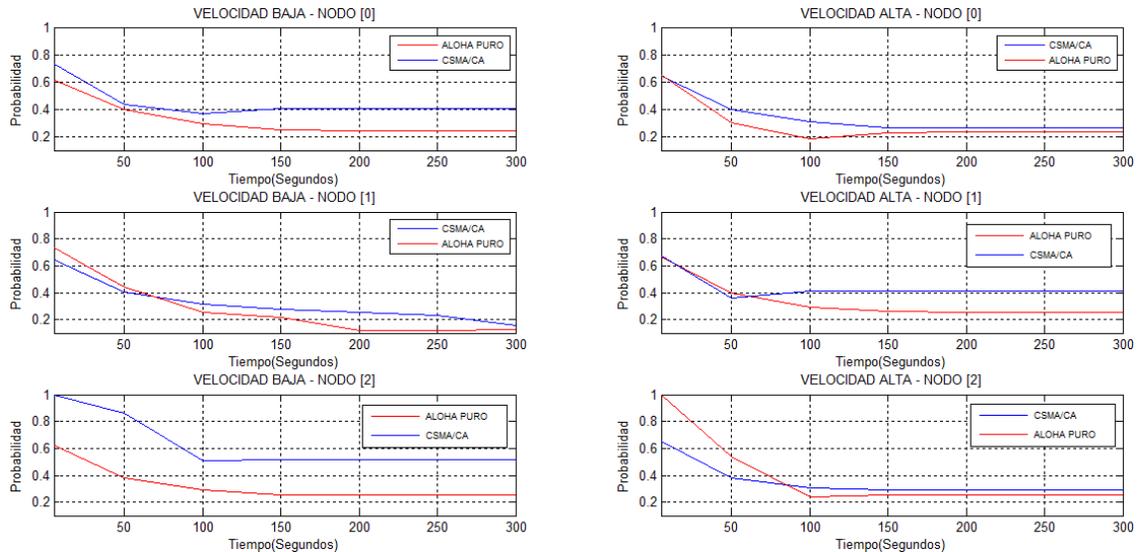


Figura 46. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 3, tasa de 6 Mbps.

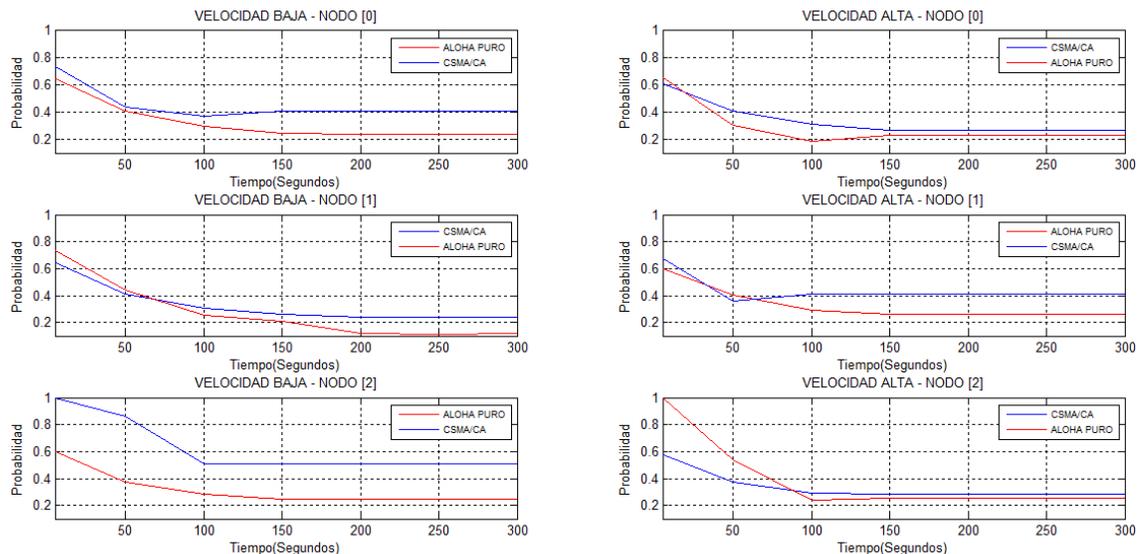


Figura 47. Probabilidad de enlace correcto en el tiempo, escenario 3, tasa de 18 Mbps.

La Figura 48 muestra la tasa de paquetes perdidos para las tasas de transferencia de datos de 6 y 18 Mbps respectivamente. A nivel general se observa cómo la cantidad de paquetes que se pierden es menor para CSMA/CA en comparación con ALOHA PURO, dada la cantidad de colisiones que se presentan para esta última técnica por no poseer ningún mecanismo que contrarreste esta situación.

Realizando una comparación con las gráficas de las tasas de paquetes perdidos de los escenarios 1 y 2, se evidencia un incremento en la cantidad de paquetes perdidos para

ambas técnicas de acceso, aunque se presenta la particularidad de que la tasa para ALOHA PURO crece en mayor medida que para CSMA/CA. Esto se debe al aumento en la cantidad de demandas de transmisión, dado el incremento en el número de nodos, exponiendo a ALOHA PURO a accesos simultáneos al medio por diferentes nodos.

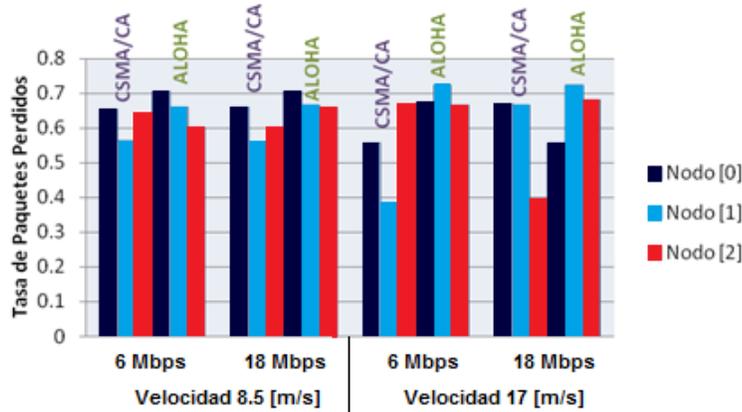


Figura 48. Tasa promedio de paquetes perdidos, escenario 3.

Finalmente, las Figuras 49 y 50 presentan el *throughput* instantáneo para tasas de 6 y 18 Mbps respectivamente. A nivel general, para CSMA/CA se observa un incremento en los valores de *throughput* considerable, para cada nodo bajo análisis, en comparación con los escenarios 1 y 2. Lo anterior se debe en este caso, al incremento en el volumen de tráfico en la red a causa de las transmisiones *broadcast* por parte de todos los nodos. En contraste, ALOHA PURO no muestra cambios significativos en sus valores de *throughput*, los cuales siguen siendo bajos básicamente por la cantidad reducida de paquetes correctamente recibidos.

El factor velocidad de los nodos influye negativamente en el valor de *throughput* a medida que dicha velocidad se incrementa, puesto que entre menor sea el tiempo que un nodo tenga para establecer un enlace y esté dentro del rango de comunicación, menor será la cantidad de paquetes recibidos de una manera exitosa.

La tasa de transferencia de CSMA/CA hace que se alcancen valores pico de *throughput* mayores, debido al incremento en el volumen de datos que se pueden transmitir por unidad de tiempo.

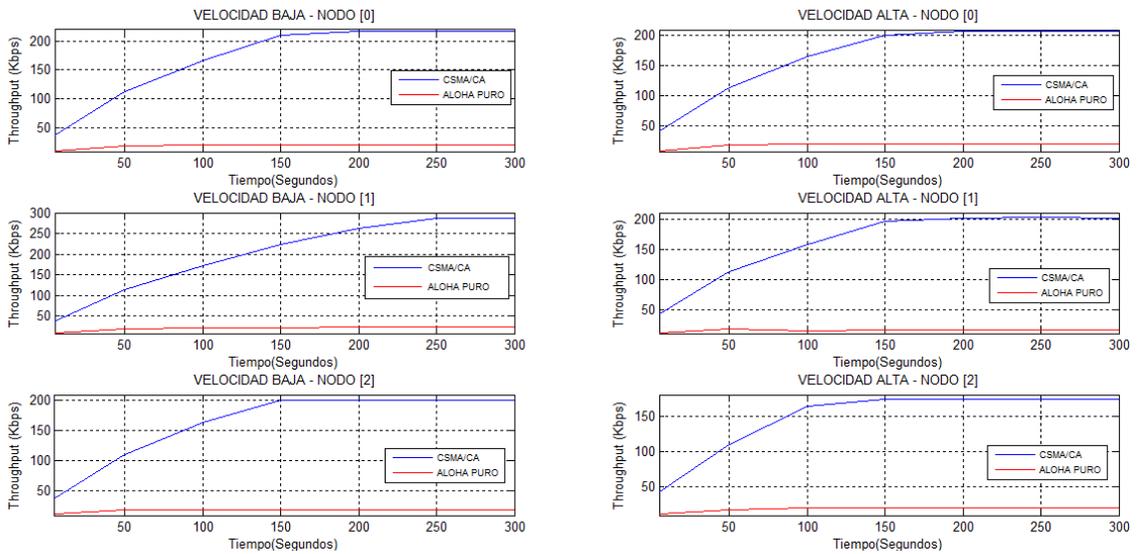


Figura 49. *Throughput* instantáneo, escenario 3, tasa de 6 Mbps.

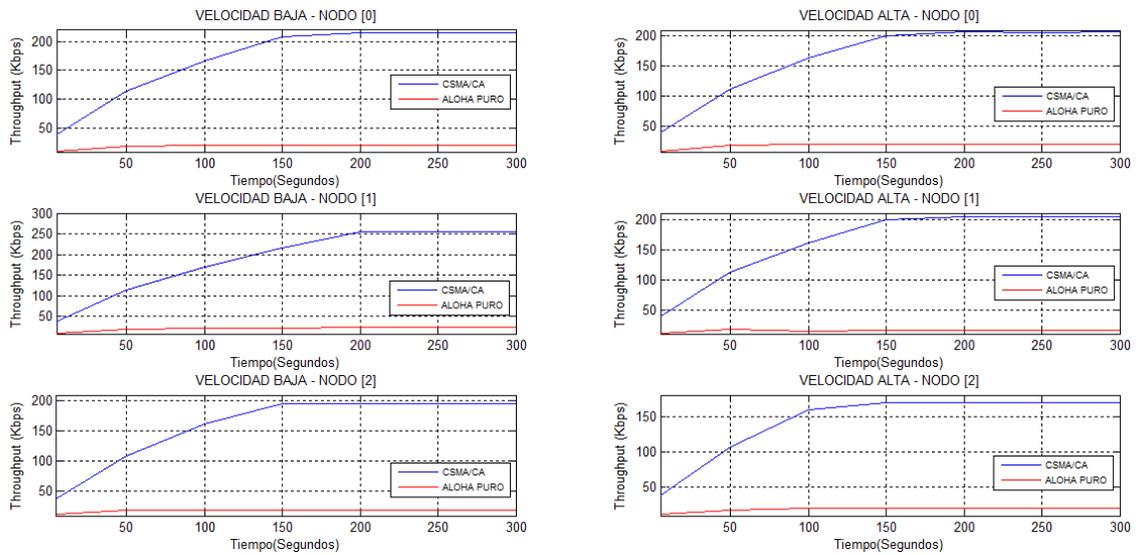


Figura 50. *Throughput* instantáneo, escenario 3, tasa de 18 Mbps.

A nivel global la tendencia en todos los escenarios muestra que para CSMA/CA existe una relación directa entre el número de usuarios y el *throughput* que éstos alcanzan; lo anterior se presenta porque, para el cálculo de éste parámetro de desempeño se toman en cuenta sólo los enlaces correctamente establecidos, más no la cantidad total de enlaces para cada nodo y al haber una mayor presencia de nodos transmitiendo de manera *broadcast* habrá un mayor volumen de tráfico de datos en la red.

Como complemento al análisis previo, se presentan a continuación los valores pico de los, para cada nodo, sin tener en cuenta la velocidad. Lo anterior con el fin de observar generalidades acerca de su rendimiento.

La Figura 51 describe los valores pico de *throughput* para una tasa de 6 Mbps y 18 Mbps respectivamente. Se observa que el mejor caso se presenta con 130 usuarios en la red y operando bajo la técnica CSMA/CA.

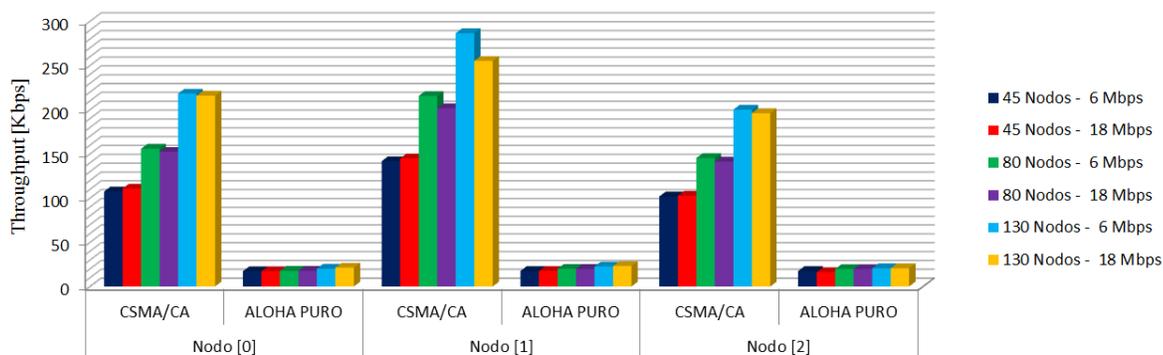


Figura 51. Valores máximos de *throughput* para 6 Mbps y 18 Mbps.

La Figura 52 describe los valores máximos de BER obtenidos para las tasas de transferencia de 6 y 18 Mbps respectivamente. Se observa cómo el rendimiento de CSMA/CA es superior al de ALOHA PURO, porque presenta menores valores en la cantidad de errores por comunicación, en cada caso y para cada nodo.

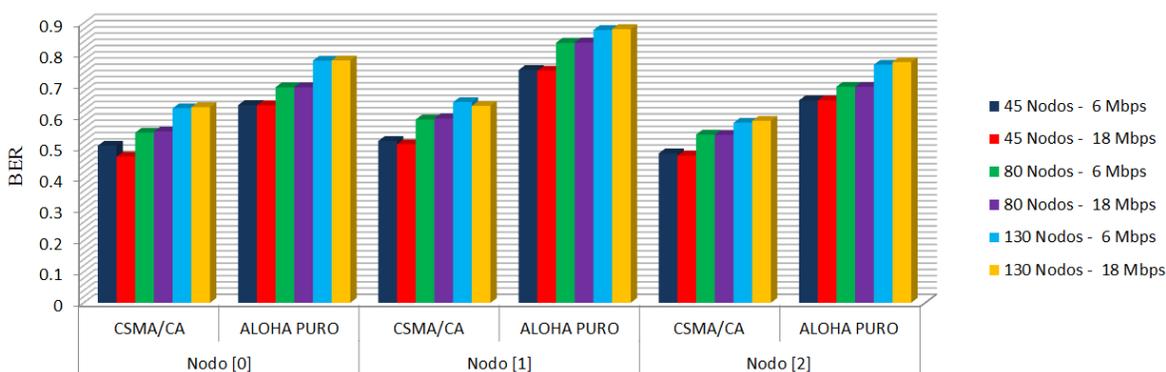


Figura 52. Valores máximos de BER para 6 Mbps y 18 Mbps.

Las Figura 53 muestra los valores pico de latencia. A diferencia de los otros parámetros de desempeño asociados a la red, en éste en particular se evidencia un mejor desempeño de ALOHA PURO presentando menores valores de latencia en comparación con CSMA/CA para cada caso.

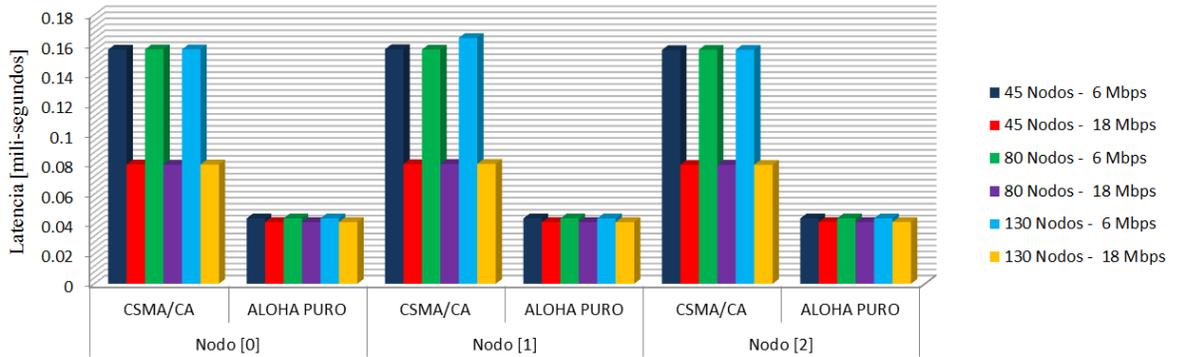


Figura 53. Valores máximos de Latencia para 6 Mbps y 18 Mbps.

La Figura 54 describe los valores mínimos de probabilidad de enlace correcto, en los cuales se destaca el mejor desempeño de CSMA/CA sobre ALOHA PURO al presentar mayor probabilidad de enlace para cada nodo y escenario, también se aprecia, cómo el número de usuarios afecta negativamente la probabilidad de lograr establecer una comunicación exitosa.

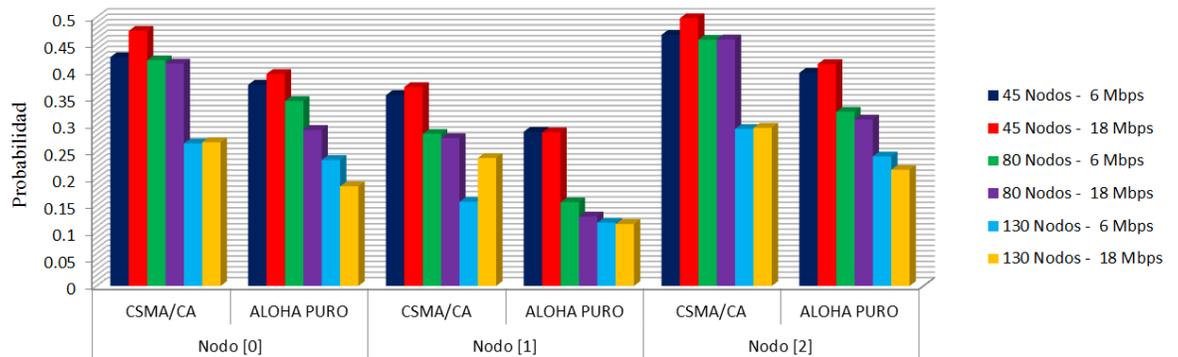


Figura 54. Valores mínimos de probabilidad de enlace correcto para 6 Mbps y 18 Mbps.

Finalmente, la Figura 55 muestra los valores máximos de la tasa de paquetes perdidos. Se observa una similitud en la cantidad de paquetes que se pierden entre CSMA/CA y ALOHA PURO para una tasa de transferencia de 6 Mbps, pero cuando la tasa sube a 18 Mbps, el rendimiento de CSMA/CA mejora considerablemente, en especial en el caso de 130 usuarios, razón por la cual la tasa de paquetes perdidos es directa respecto al número de usuarios presentes en la red.

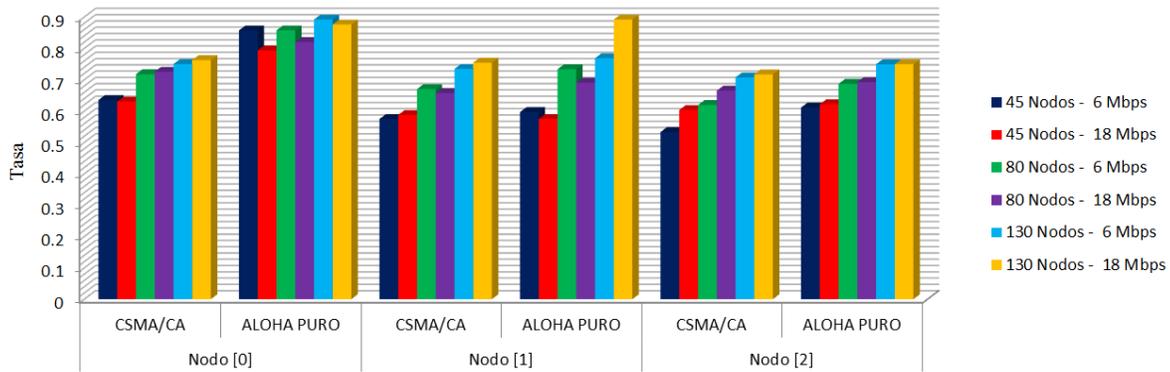


Figura 55. Valores máximos para la tasa de paquetes perdidos para 6 Mbps y 18 Mbps.

En resumen, la densidad de nodos, la velocidad de los mismos y la tasa de transferencia de datos a la cual se establecen comunicaciones, afectan el desempeño de la técnica de acceso en redes VANET.

El Anexo A de este trabajo de grado presenta información relevante acerca de los parámetros asociados a la técnica de acceso (AIFS, Número de Colas, Ventana de contención) que inciden en el desempeño de una red VANET.

A continuación, en la Tabla 16, se resumen los resultados de simulación al implementar las técnicas de acceso CSMA/CA y ALOHA PURO en una comunicación de datos de una red VANET.

Escenario	Caso	Throughput Promedio		BER Promedio		Latencia Promedio		Probabilidad de Enlace Promedio		Tasa de Paquetes Perdidos Promedio	
		CSMA/CA	ALOHA PURO	CSMA/CA	ALOHA PURO	CSMA/CA	ALOHA PURO	CSMA/CA	ALOHA PURO	CSMA/CA	ALOHA PURO
1	Vel. Baja - 6 Mbps	82.293 Kbps	15.045 Kbps	0.412	0.495	153.8 ms	43.7 ms	0.571	0.496	0.429	0.504
	Vel. Alta- 6 Mbps	80.829 Kbps	15.028 Kbps	0.421	0.495	78.9 ms	41.7 ms	0.572	0.483	0.429	0.517
	Vel. Baja -18 Mbps	90.875 Kbps	13.539 Kbps	0.436	0.414	154 ms	43.7 ms	0.638	0.467	0.421	0.533
	Vel. Alta-18 Mbps	92.324 Kbps	14.228 Kbps	0.425	0.435	79 ms	41.3 ms	0.638	0.480	0.449	0.520
2	Vel. Baja - 6 Mbps	112.141 Kbps	15.887 Kbps	0.480	0.523	153.8 ms	43.7 ms	0.534	0.416	0.467	0.584
	Vel. Alta- 6 Mbps	111.545 Kbps	15.879 Kbps	0.485	0.523	78.8 ms	41.3 ms	0.534	0.408	0.467	0.592
	Vel. Baja -18 Mbps	127.930 Kbps	15.387 Kbps	0.496	0.519	154.1 ms	43.7 ms	0.572	0.397	0.502	0.603
	Vel. Alta-18 Mbps	124.248 Kbps	15.381 Kbps	0.500	0.491	79.0 ms	41.3 ms	0.572	0.391	0.530	0.609
3	Vel. Baja - 6 Mbps	155.464 Kbps	17.743 Kbps	0.540	0.648	153.6 ms	43.8 ms	0.379	0.349	0.623	0.666
	Vel. Alta- 6 Mbps	154.487 Kbps	17.727 Kbps	0.544	0.649	78.8 ms	41.3 ms	0.378	0.339	0.623	0.661
	Vel. Baja -18 Mbps	174.885 Kbps	17.935 Kbps	0.557	0.590	177.13 ms	43.8 ms	0.458	0.328	0.555	0.668
	Vel. Alta-18 Mbps	170.020 Kbps	17.809 Kbps	0.558	0.591	78.9 ms	41.3 ms	0.456	0.328	0.559	0.671

Tabla 16. Resumen del desempeño en una comunicación de datos en una VANET con las técnicas de acceso CSMA/CA y ALOHA PURO. Por los Autores.

De los datos en la Tabla 16 y de la ejecución las diferentes simulaciones, se presentan las siguientes conclusiones:

- ✓ La técnica de acceso CSMA/CA en los tres escenarios de simulación presentó valores menores de BER (tanto promedios como instantáneos) en comparación con ALOHA PURO. Esto se debe a los mecanismos anti-colisiones y de escucha previa del medio que usa CSMA/CA.
- ✓ El valor de la latencia no se ve significativamente afectado cuando la velocidad de los nodos cambia sustancialmente. Este comportamiento se observó para ambas técnicas de acceso analizadas.
- ✓ La latencia en ALOHA PURO es menos impactada cuando varía la tasa de datos, algo que no ocurre en CSMA/CA, en donde se observa un mayor al aumentar la tasa de datos.
- ✓ El valor mínimo de *throughput* instantáneo lo presentó la técnica ALOHA PURO en el escenario 1, al obtener un valor de 13.54 Kbps. Este valor indica que en ésta técnica de acceso se presenta un elevado número de colisiones, impidiendo que los valores de *throughput* se eleven a los niveles obtenidos por CSMA/CA.
- ✓ El valor máximo de *throughput* instantáneo fue alcanzado por la técnica CSMA/CA en el escenario 3. Aproximadamente alcanza los 300 Kbps, el cual es un valor de que se obtuvo mediante simulación.

En general, la técnica de acceso CSMA/CA presentó mejor desempeño en BER, *throughput*, probabilidad de enlace correcto y tasa de paquetes errados.

Este capítulo presentó los resultados obtenidos y su análisis, al simular los tres escenarios definidos para las redes VANET.

El capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas después del desarrollo del proyecto, además presenta recomendaciones y una serie de trabajos futuros que pueden surgir con referencia a ésta temática.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

INTRODUCCIÓN

Este capítulo expone las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que deja el desarrollo de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en su desarrollo, tal como se ha registrado a lo largo de este documento. Las recomendaciones se dan acerca de la metodología elegida; y los trabajos futuros con respecto a las herramientas, escenarios de simulación y técnicas de acceso.

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. Respecto a las Técnicas de Acceso

- ✓ La técnica de acceso ALOHA PURO dada la simplicidad de funcionamiento presentó menor retardo que la técnica CSMA/CA.
- ✓ Parámetros de desempeño como el *throughput* y la tasa de paquetes perdidos pueden mejorarse para la técnica de CSMA/CA incrementando el tamaño de almacenamiento de sus colas para obtener una ventaja más notoria sobre el funcionamiento de ALOHA PURO, pero en contraste se aumenta más la latencia en las comunicaciones. Por lo tanto se debe hacer un balance entre las dos situaciones.
- ✓ CSMA/CA a pesar de ser la técnica de acceso que está estandarizada para las redes VANET por la IEEE y a pesar de presentar en términos generales un mejor desempeño frente ALOHA PURO, no ofrece un desempeño en la red Ad-hoc vehicular a nivel MAC óptimo para un entorno real.

5.1.2. Respecto al Desarrollo de la Simulación y a la Herramienta de Simulación

- ✓ El tiempo de simulación establecido debe permitir observar todos los eventos relevantes para cada caso en estudio. Para el caso de las redes VANET, no se requieren tiempos muy elevados dada la alta periodicidad con que se transmiten y/o reciben paquetes.
- ✓ En OMNet ++ se debe realizar un proceso de construcción de todo el escenario de simulación cuando se hacen cambios en los archivos fuente de las técnicas de acceso.
- ✓ Cada proceso de simulación debe tener en cuenta las características dadas por los estándares utilizados, por la técnica de acceso tenida en cuenta y por el medio.

5.1.3. Respecto a los Resultados de Simulación

- ✓ El aumento en el número de nodos influyó directamente en el aumento de *throughput* promedio e instantáneo para CSMA/CA en los nodos estudiados. Esto ocurre principalmente porque, al presentarse un escenario con un elevado número de usuarios, los nodos pueden transmitir y/o recibir datos a mayor velocidad haciendo uso de envíos multi-salto y a la transmisión broadcast que se utilizo.
- ✓ La latencia observada en ALOHA PURO fue menor en relación a la observada en CSMA/CA y dicho parámetro de desempeño no se vio significativamente afectado por el aumento en el número de usuarios. Lo anterior ocurre por la *no* escucha del medio por parte de ALOHA PURO, transmitiendo sin importar el estado de éste.
- ✓ La probabilidad de enlace correcto se ve afectada principalmente por el número de usuarios presentes en la red, dado que se presenta una mayor contienda por acceder a los recursos por parte de los nodos en la red vehicular.
- ✓ A nivel general, la técnica de acceso CSMA/CA presentó un mejor desempeño en cuatro de cinco parámetros de desempeño evaluados en comparación a ALOHA PURO. Sólo en la latencia, ALOHA PURO es mejor a CSMA/CA.
- ✓ La tasa de error de bits se vio afectada sustancialmente por el número de usuarios presentes en la red, dado que, a mayor número de usuarios, mayor BER. También se vio afectada de menor manera por la tasa de bits.
- ✓ El aumento en el tamaño de las colas afecta positivamente el desempeño de la técnica de acceso CSMA/CA, sin embargo se deben tener en cuenta los retardos de encolamiento que se pueden producir en el paquete de datos y los inconvenientes que se pueden generar al aumentar dicho tamaño de las colas.
- ✓ La reducción del valor de AIFS en CSMA/CA permite una respuesta rápida por parte de los nodos en el momento de determinar el estado del canal, si está libre u ocupado influyendo positivamente en el desempeño general de esta técnica de acceso. Por otra parte se debe tener en cuenta, factores específicos del estándar para que dicha reducción sea positiva.
- ✓ El valor mas pequeño de la ventana de contención en la técnica CSMA/CA, al estar ligado con el valor de *backoff*, impacta positivamente en el desempeño general de la red, ya que cuando éste se reduce los nodos gastan menos tiempo en ejecutar una retransmisión.

5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Es preciso llevar a cabo un análisis comparativo de herramientas de simulación para determinar las que más se adecúen a las necesidades particulares del trabajo a desarrollar.

- ✓ Para el desarrollo de trabajos basados en simulación, se recomienda definir con un adecuado nivel de detalle los escenarios y casos a tener en cuenta; lo anterior con el fin de facilitar el trabajo y llevar una guía de las simulaciones a realizar.
- ✓ Cuando se trabaje con OMNeT++, se recomienda utilizar el botón “*Express*” para acelerar el desarrollo de las simulaciones, de no utilizarlos las simulaciones pueden durar muchas horas o días.
- ✓ Es recomendable poseer conocimientos intermedios de lenguaje C cuando se trabaja con OMNeT++, dado que se basa en éste lenguaje de programación y, en muchas ocasiones se requiere la creación de módulos extra para satisfacer necesidades particulares.
- ✓ Al momento de exportar los mapas desde *openstreetmap*, se recomienda realizar una edición con la herramienta JOSM, ya que muchas veces, con la exportación se presentan cambios en el área del mapa que no existen en la realidad; por lo que la edición con dicha herramienta es necesaria para un entorno realista.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

- ✓ El simulador OMNeT++ no implementa la comunicación V2I, necesaria para implementaciones más realistas. Se propone realizar la creación de módulos mediante código NED y C++ con el fin de obtener un análisis de desempeño más riguroso de las técnicas de acceso en redes VANET.
- ✓ En este proyecto se evaluó el desempeño de las técnicas de acceso en un escenario tipo glorieta, por lo que se propone la simulación en otros entornos más céntricos (tipo *Manhattan Grid*) y tener en cuenta parámetros de desempeño adicionales a los presentados en este documento.
- ✓ Dado que OMNeT++ es una herramienta basada en código, se propone la generación de una interfaz gráfica amigable, que permitan graficar los resultados de los diversos parámetros de desempeño evaluados. Lo anterior para facilitar el análisis de los resultados.
- ✓ Se propone desarrollar diversos módulos que faciliten la interconexión entre las dos librerías más utilizadas en OMNeT++: MiXIM e INET. Dado que esta última toma en cuenta parámetros de desempeño adicionales no presentes en MiXIM.

REFERENCIAS

- [1] M. Emmelmann, B. Bochow, and C. Kellum, *Vehicular Networking: Automotive Applications and Beyond*, 1st ed. Gran Bretaña: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [2] H. Hartenstein and K. Laberteaux, *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies.*: Wiley: Jhon Wiley and sons Ltd, 2010.
- [3] S. Senouci, H. Moustafa, and M. Jerbi, *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 1st ed. Boston, Massachusetts, USA: Auerbach Publications, 2009, ch. 1.
- [4] R. Baldessari et al., "Flexible Connectivity Management in Vehicular Communication Networks", in *Proc. of International Workshop on Intelligent Transportation*, Hamburgo, Alemania, 2006.
- [5] Z. Yahya and S. Masud, "Communications in Vehicular Networks", *Wayne State University*, Detroit, Michigan, USA, 2008.
- [6] J. Lozano, *Arquitectura de una Plataforma Telemática Integral para el Despliegue de Servicios Ubicuos en el Ámbito de los Sistemas Inteligentes de Transporte*, Especialidad: Ingeniería de la Información y las comunicaciones, Universidad de Murcia PhD Tesis, Ed. Murcia, 2009.
- [7] I. Leontiadis and C. Mascolo, "GeOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks", in *IEEE Internat. Sympos. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Helsinki, Finland, ACM 2007, pp. 1-6.
- [8] A. Pachón, C. Nieto, and M. Velasco, "Modelos de comportamiento de las redes vehiculares en sus escenarios más representativos, utilizando simulación en la herramienta NCTUns", *Sistemas y Telemática: Revista de la Facultad de Ingeniería*, vol. 8, no. 15, pp. 13-25, 2010.
- [9] ETSI TR 102 638 (V.1.1.1), "Intelligent Transport Systems (ITS)", Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions, 2009.
- [10] D. Chavarro and O. Orozco, *Impacto De La Velocidad Y Modelo De Movilidad En Una Comunicación De Datos De Una Red Vehicular*. Universidad del Cauca, Tesis Pregrado, Popayán, Colombia, 2013.
- [11] J. Chen and A. Somani, "Fair scheduling in wireless ad-hoc networks of location dependent channel errors", in *Proceedings of the 2003 IEEE International*, 2003.
- [12] M. Younis and T. Nadeem, "Energy Efficient MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, 2004.
- [13] J. Boosyen et al., "A Survey of Media Access Control (MAC) Protocols for Vehicular

Ad-hoc NETWORKS (VANETs)", *Stellenbosch University*, Department of Electrical and Electronic Engineering and MIH Media Laboratory, 2008.

- [14] Y. Ko et al., "MAC protocols using directional antennas in IEEE 802.11 based ad hoc networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2006.
- [15] V. Shankarkumar et al., "Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks", Department of Computer Science, Texas A&M University, 2006.
- [16] Z. Haas and J. Deng, "Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA)—A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks", *IEEE Transactions on Communications*, 2002.
- [17] D. Tureli et al., "Effective channel utilization using the RI-BTMA protocol", *Wireless Network Security Center*, 2004.
- [18] S. Singh, "PAMAS-Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad-hoc Networks", Department of Electrical and Computer Engineering, Oregon State University, 1998.
- [19] F. Liu et al., "Energy-efficient MAC layer protocols in ad hoc networks", Department of Computer Science, George Washington University, 2004.
- [20] S. Wu et al., "A multi-channel MAC protocol with Power Control for Multi-hop Mobile Ad Hoc Networks", Department of Computer Science and Information Engineering, National Chiao-Tung University, 2002.
- [21] E. Jung and N. Vaidya, "A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks", Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, 2009.
- [22] G. Holland et al., "A Rate-Adaptive MAC Protocol for Wireless Networks", Technical Report TR00-019, Dept. of Computer Science, Texas University. 2008.
- [23] B. Sadeghi et al., "Opportunistic Media Access for Multi-rate Ad Hoc Networks", Department of Electrical and Computer Engineering, Rice University, 2006.
- [24] ETSI EN 302 663 (V.1.2.0), , Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band, 2012.
- [25] TSI TR 102 862 (V.1.1), , Intelligent Transport Systems (ITS); Performance Evaluation of Self-Organizing TDMA as Medium Access Control Method Applied to ITS; Access Layer Part 2011.
- [26] S. Selvakeneddy, "Performance study of distributed coordination function over IEEE

- 802.11a physical layer", *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 10-20, School of Engineering, Taylor's College, 2006.
- [27] L Kleinrock and F. Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part I—carrier sense multiple access modes and their throughput-delay characteristics", pp. 1400–1416, Diciembre IEEE Trans. Commun. 1975.
- [28] U. Sylvester, O. Prince, and E. Edward, "Carrier Sensing Mechanisms: the Impact on Throughput Performance of IEEE 802.11 WLANs", ISSN: 1839-8480, IJAR-CSIT 1(1), Vol. 1, Issue 1, Article 01, March, 2012, p. 1 – 12.
- [29] V. Bhargavan et al., "MACAW—A Media Access protocol for wireless Lans", in *Proceedings of the ACM SIGCOMM*, 1994, pp. 212–225.
- [30] F. Talucci et al., "MACA-BI (MACA By Invitation) A Receiver Oriented Access Protocol for Wireless Multihop Networks", Departamento de Electrónica, Italia, 2008.
- [31] R. Choudhury et al., "Using directional antennas for medium Access control in ad hoc networks", in *Proceedings of the ACM MOBICOM*, 2002.
- [32] C. Fullmer and J. Aceves, "Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for packet-radio networks", in *Proc. ACM SIGCOMM*, Cambridge MA, August 28–September 1, 1995.
- [33] A. Abedi and M. Razfar, "Single Channel Versus Multichannel MAC Protocols for Mobile Ad Hoc Networks", The University of Maine, WiSe-Net, Laboratory. Paper 16. 2011.
- [34] S. Wu, Y. Tseng, and J. Sheu, "Intelligent Medium Access for Mobile Ad Hoc Networks with Busy Tones and Power Control", Department of Computer Science and Information, Engineering National Central University, 2001.
- [35] Q. Dong and W. Dargie, "A Survey on Mobility and Mobility-Aware MAC Protocols in Wireless Sensor Networks", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, 2010.
- [36] J. Monks et al., "A Power Controlled Multiple Access protocol for wireless packet networks", in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, April 2001.
- [37] N. Matloff, "Some Utilization Analyses for ALOHA and CSMA Protocols", , University of California at Davis, May 18, 2000.
- [38] Universidad de Oviedo, "Redes Telematicas", Tema 4, Ingenieria de sistemas y automática, 2011..
- [39] I. Khalil et al., "An Adaptive OFDMA-Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks", sensors, ISSN 1424-8220, 2012.

- [40] R. Gallego et al., "IFIP International Federation for Information Processing", in *Personal Wireless Communications*, B. Simak, R. Bestak, and E. Kozowska, Eds.: Boston: Springer, 2007, pp. 13-24.
- [41] F. Amado, "Técnicas De Acceso Múltiple Y Algoritmos De Detección De Múltiples Usuarios En Telefonía celular: Análisis Comparativo", Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2008.
- [42] Q. Yang et al., "An Evolutionary MAC Protocol Based on FPRP for Decreasing Delay", School of Information Science and Technology, Xiamen University, 2010.
- [43] C. Zhu and M. Corson, "A Five-Phase Reservation Protocol (FPRP) for Mobile Ad Hoc Networks", in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 1998.
- [44] C. Toh, "Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems", , Prentice-Hall PTR, NJ, 2002.
- [45] Y. Bi et al., "A Multi-Channel Token Ring Protocol for QoS Provisioning in Inter-Vehicle Communications", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 11, 2009.
- [46] S. Basagni et al., "Mobile Ad Hoc Networking: The Cutting Edge Directions", John Wiley & Sons, 2013.
- [47] E. Jung and N. Vaidya, "An energy efficient MAC protocol for wireless LANs", in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, June, 2002.
- [48] M. Ali and Z. Uzmi, "Medium Access Control with Mobility-Adaptive Mechanisms for Wireless Sensor Networks", Computer Science Department, Lahore University of Management Sciences, Lahore, Pakistan, 2010.
- [49] M. Ali et al., "MMAC: A Mobility- Adaptive, Collision-Free MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", Computer Science Department, Pakistan, 2010.
- [50] F. Borgonovo et al., "RR-ALOHA, a Reliable R-ALOHA broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks", Departamento de Electrónica e Informática, 2001.
- [51] J. Gallego, "Dipartimento Elettronica e Informazione", Universidad de Zaragoza, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, 2007.
- [52] R. Scopigno and H. Cozzetti, "Mobile Slotted Aloha for Vanets", in *70th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, 2009.
- [53] R. Scopigno and A. Cozzetti, "Evaluation of Time-Space Efficiency in CSMA/CA and Slotted Vanets", in *72nd IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, 2010, pp. 1-5.

- [54] F. Borgonovo, "ADHOC MAC: new MAC architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services", , Departamento de Electrónica e Informática, Milano, Italia, 2003.
- [55] M. Liu, "Survey of MAC Layer Protocols for vehicular Ad Hoc Network", no. 2, pp. 11-18, MECS , I.J. Information Technology and Computer Science,2011.
- [56] J. Liu et al., "A-ADHOC: An Adaptive Real-time Distributed MAC Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks", Mobile Networks and Applications, 2011.
- [57] J. Mittag, "CHARACTERIZATION, AVOIDANCE AND REPAIR OF PACKET COLLISIONS IN INTERVEHICLE COMMUNICATION NETWORKS", Universität des Landes Baden-Württemberg undnationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2010.
- [58] D. Moltchanov, "MAC Protocols", TUT, 2011.
- [59] B. Bishaj, "MAC protocols, Contention-based with reservation and scheduling", 2010.
- [60] E. Jeong et al., "Dynamic TDMA with Priority-based request Packet Transmission Scheme for Integrated Multimedia Traffics", 1997.
- [61] M. Abdullah-Al-Wadud, "A TDMA Scheme for Mobile Sensor Networks", Department of Industrial and Management Engineering, Hankuk University of Foreign Studies, 2013.
- [62] J. Jean and P. Hubaux, "A Survey of Inter-Vehicle Communication", School of Computer and Communication Sciences, Lausanne, Switzerland, 2010.
- [63] J. Gallego, "Contribución al desarrollo de Protocolos de Acceso al Medio (MAC) en Redes Inalámbricas Ad Hoc Multiservicio", Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza , Zaragoza, 2007.
- [64] K. Bilstrup et al., "Evaluation of the IEEE 802.11p MAC method for Vehicle-to-Vehicle Communication", Centre for Research on Embedded Systems, Halmstad University, 2008.
- [65] K. Bilstrup, "On the ability of ieee 802.11p and stdma to provide predictable channel access", Centre for Research on Embedded Systems, Halmstad University, 2008.
- [66] W. Zhu, Th. Hellmich, and B. Walke, "DCAP, A Decentral Channel Access Protocol: Performance Analysis", in *Proc. 41. IEEE, VTC-Conf. St. Louis*, , Missouri, Mayo, 1991, p. 22.
- [67] Z. Tang and J. Aceves, "Hop-Reservation Multiple Access (HRMA) for ad hoc networks", in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 1999.

- [68] R. Tomar and S. Verma, "RSU Assisted Channel Allocation in VANETs", *International Journal of Contemporary Research in Engg. and Tech*, vol. 1, no. 1, 2011.
- [69] C. Ahn, C. Kang, and Y. Cho, "Soft reservation multiple access with priority assignment (SRMA/PA): a novel MAC protocol for QoS-guaranteed integrated services in mobile ad hoc networks", in *Proceedings of the IEEE VTC*, vol. 2, 2000, pp. 942–947.
- [70] C. Park, M. Ryu, and K. Cho, "Survey of MAC Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks", *Smart Computing Review*, vol. 2, no. 4, pp. 286-295, Agosto 2012.
- [71] K. Hafeez et al., "Distributed Multichannel and Mobility-Aware Cluster-Based MAC Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol. 62, no. 8, Octubre 2013.
- [72] Z. Rawashdeh and M. Mahmud, "Media Access Technique for Cluster-Based Vehicular Ad Hoc Networks", *Electrical and Computer Engineering Department, Wayne State University*, 2008.
- [73] IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements,, 2010.
- [74] K. Sjöberg, "Medium Access Control for Vehicular Ad Hoc Networks", Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2013.
- [75] Y. Wu et al., "Safety-Message Broadcast in Vehicular Ad Hoc Networks Based on Protocol Sequences", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, pp. 1467–1479, 2014.
- [76] M. Kaynia, "Analysis and Improvement of Wireless Ad Hoc Network Performance Through MAC and PHY Layer Design", Doctoral Thesis, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [77] B. Błaszczyszyn, P. Mühlethaler, and Y. Toor, "Stochastic Analysis of ALOHA PURO in Vehicular Ad-hoc Networks", *Annales of Telecommunications*, vol. 68, no. 86, pp. 95-106 , Mayo 2012.
- [78] A. Boukerche, "Handbook of Algorithms for Wireless Networking and Mobile Computing", in *Computer and information Science Series.:* Chapman and Hall/CRC, 2006, ch. 3.
- [79] V. Bagad and I. Dhotre, "Computer network", ed. Technical Publications Pune, 2009, ch. 4.

- [80] J. Hsu, "Physical, Medium Access and Routing Based Cross-layer Control Using Directional Antennas and Multi-rate Radios in Wireless Ad Hoc Networks", in *ProQuest LLC.*, 2009, ch. 2.
- [81] F. Baccelli, B. Błaszczyszyn, and P. Mühlethaler, "An ALOHA PURO Protocol for Multihop Mobile Wireless Networks", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 2, Febrero 2006.
- [82] P. Mühlethaler et al., "Comparison between ALOHA PURO and CSMA in multiple hop ad hoc networks", *National Institute for Research in Computer Science and Control*, 2004.
- [83] K. Bilstrup et al., "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*, Hindawi Publishing Corporation, 2009.
- [84] M. Kaynia, "Analysis and Improvement of Wireless Ad Hoc Network Performance Through MAC and PHY Layer Design", Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Trondheim, November 2010.
- [85] B. Błaszczyszyn, P. Mühlethaler, and Y. Toor, "Modeling and analysis of slotted and non-slotted ALOHA PURO in linear Vehicular Ad-hoc NETWORKS", versión 1, 2010.
- [86] B. Błaszczyszyn et al., "Comparison of the maximal spatial throughput of ALOHA PURO and CSMA in Wireless multihop Ad-Hoc Networks", *Wireless Ad-Hoc Networks InTech Ed*, 2012.
- [87] M. Kaynia, and M. Latva-aho P. Nardelli, "Efficiency of the ALOHA PURO Protocol in Multi-Hop Networks", Centre for Wireless Communications, University of Oulu, 2011.
- [88] M. Fernandez, "Performance Evaluation of Frame Slotted ALOHA PURO with Diversity and Interference Cancellation", Tesis Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [89] V. Khairnar and K. Kotecha, "Performance of Vehicle-to-Vehicle Communication using IEEE 802.11p in Vehicular Ad-hoc Network Environment", *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*, vol. 5, no. 2, March 2013.
- [90] R. Gome and S. Sharna, "Compare the performance of CSMA & ALOHA PURO protocols in 802.11p on the basis of mean density of progress in Rayleigh fading environment using MATLAB", Department of Electronics and Communication Engineering Asst. Professor, SVITS, Indore, M.P., India, 2013.
- [91] S. Theodore and S. Fidelis, "Throughput Improved -Adaptive CSMA MAC Protocol Design with Power Optimistic for MANET", *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, vol. 2, May 2013.

- [92] Y. Wang et al., "IEEE 802.11p Performance Evaluation and Protocol Enhancement", Viterbi School of Engineering, University of Southern California, 2008.
- [93] M. Behrish, L. Bieker, J. Erdmann, and D. Krajzewicz, "Simulation of Urban Mobility: An Overview In SIMUL 2011", in *The Third International Conference on Advances in System Simulation*, 2011.
- [94] OMNeT++ Network Simulation Framework. ([Consultado: 10 febrero 2014]) OMNeT Tutorials. [Online]. <http://www.omnetpp.org/>
- [95] O. Rehman et al., "Impact of NS-2 as FOSS Simulation Tool for Research in Vehicular Ad-hoc Network", in *Free and Open Source Software Conference*, 2013.
- [96] F. Martinez et al., "A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs)", *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 813-828, 2011.
- [97] O. Ülgen et al., "Simulation Methodology -- A Practitioner's Perspective", University of Michigan-Dearborn, MI, 2006.
- [98] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building", *Simulation Methodology – Discrete Event Simulation*, 2003.
- [99] H. Muñoz, "Respuesta a Derecho de Petición", Secretaría de Tránsito Municipal, Popayán, Cauca, Abril de 2013.
- [100] H. Moustafa and Y. Zhang, *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 2nd ed. Boston, Massachusetts, USA: Auerbach Publications, 2011.