

MODELO PARA EL PROCESO DE ELECCIÓN DE TIEMPO DE BACK-OFF EN CSMA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS PARA REDES VANET



JUAN SEBASTIÁN MAMIÁN LÓPEZ
JOSE LUIS ROSALES RODRÍGUEZ

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Comunicaciones
Popayán, 2014

MODELO PARA EL PROCESO DE ELECCIÓN DE TIEMPO DE BACK-OFF EN CSMA BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS PARA REDES VANET



TRABAJO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

JUAN SEBASTIÁN MAMIÁN LÓPEZ
JOSE LUIS ROSALES RODRÍGUEZ

Director:
VÍCTOR MIRAMÁ PÉREZ

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Comunicaciones
Popayán, 2014

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1.REDES VEHICULARES AD HOC VANET	3
1.1. ESTÁNDARES IEEE 1609 Y EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P	5
1.1.1. Capa MAC en IEEE 802.11p.....	7
1.1.2. Canal de Control y Canal de Servicio (CCH y SCH).....	8
1.1.3. Categorías de Acceso.....	10
1.1.4. Detección del medio.....	12
1.1.5. Contienda por el Medio	12
1.1.6. Back-off binario exponencial	14
2.NOCIONES BÁSICAS Y MODELOS DE TEORÍA DE JUEGOS	17
2.1. TIPOS DE JUEGOS.....	17
2.2. ESTRATEGIAS.....	20
2.3. EQUILIBRIO	22
2.4. MODELOS DE TEORÍA DE JUEGOS PARA ACCESO MÚLTIPLE ALEATORIO EN REDES INALÁMBRICAS.....	22
3.ADAPTACIÓN DEL MODELO.....	31
3.1. ADAPTACIÓN DEL MODELO.....	31
3.2. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA REDES VANET.	38
3.2.1. Simuladores Aislados.....	38
3.2.2. Simuladores Integrados	39
3.2.3. Simuladores Híbridos.....	40
3.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	41
3.3.1. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación.....	41
3.3.2. Definición de las Características de los Escenarios y Casos de Simulación.....	42
3.3.3. Ejecución de las pruebas de simulación.....	47
3.3.4. Análisis de Resultados.....	47
4.CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	92
4.1. CONCLUSIONES	92
4.2. RECOMENDACIONES	93
4.3. TRABAJOS FUTUROS	94
REFERENCIAS.....	96

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Red VANET y sus distintos dominios de red.....	4
Figura 1.2 Familia IEEE 1609 y el estándar IEEE 802.11p.....	6
Figura 1.3 Modelo básico de referencia para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares...7	7
Figura 1.4 Canal de Control y los Canales de Servicio de la capa MAC.....	8
Figura 1.5 Modos de Uso del Canal de Control y los Canales de Servicio.....	9
Figura 1.6 Rango de frecuencia de CCH y SCH.....	10
Figura 1.7 Invocación del Proceso de <i>Back-off</i>	14
Figura 1.8 Proceso de <i>Back-off</i>	15
Figura 1.9 Contienda por el Medio.....	16
Figura 2.1 Matriz del juego Estático No Cooperativo..	23
Figura 2.2 Matriz del Juego incompletamente Cooperativo..	27
Figura 3.1 Diagrama de Flujo del algoritmo RAG..	37
Figura 3.2 Escenarios y Casos de Simulación.....	41
Figura 3.3 Mapa Original de la zona. Tomada de <i>OpenStreetMap</i>	42
Figura 3.4 Mapa generado por la herramienta SUMO.	43
Figura 3.5 Nivel de Congestión Vehicular experimentado por los Nodos 72 y 190.	49
Figura 3.6 Total de Colisiones para cada Vehículo, Escenario 1.	50
Figura 3.7 Porcentaje de tramas descartadas, Escenario 1.....	51
Figura 3.8 Número promedio de intentos de transmisión por trama, Escenario 1.....	52
Figura 3.9 Tiempo promedio que tardan las tramas en superar el proceso de contienda exitosamente, Escenario 1.....	53
Figura 3.10 Ventana de Contienda para cada AC Nodo 72, Escenario 1.	54
Figura 3.11 Colisiones por intento de Transmisión (CpTx), Nodo 72, Escenario 1.	56
Figura 3.12 <i>Throughput</i> medido en ACKs por segundo para cada AC, Nodo 72, Escenario 1. .57	57
Figura 3.13 Tramas Descartadas por cada AC, Nodo 72, Escenario 1.....	58
Figura 3.14 Número promedio de Intentos por transmisión, Nodo 72, Escenario 1.	60
Figura 3.15. Tiempo promedio que permanecen las tramas en Contienda para cada AC, Escenario 1.	61

Figura 3.16 Ventana de Contienda para cada Clase de Acceso, Nodo 190, Escenario 1.....	62
Figura 3.17 Colisiones por intento de transmisión, Nodo 190, Escenario1.	63
Figura 3.18 <i>Throughput</i> medido en ACK por cada AC, Nodo 190, Escenario 1.	64
Figura 3.19 Tramas descartadas por cada AC, Nodo 190, Escenario 1.	65
Figura 3.20 Número Promedio de intentos de Transmisión por cada AC, Nodo 190, Escenario 1.	66
Figura 3.21 Tiempo promedio que las tramas permanecen en contienda para cada AC, Nodo 190, Escenario 1.	67
Figura 3.22 Total de Colisiones para cada vehículo, Escenario 2.....	68
Figura 3.23 Porcentaje de tramas Descartadas, Escenario 2.	69
Figura 3.24 Número promedio de intentos para cada trama, Escenario 2.	70
Figura 3.25 Tiempo promedio que tardan las tramas en superar el proceso de contienda, Escenario 2.	71
Figura 3.26 Ventana de Contienda por Clase de Acceso para el nodo 72, Escenario 2.	73
Figura 3.27 Colisiones por intento de Transmisión para el Nodo 72. Escenario 2.	74
Figura 3.28 <i>Throughput</i> expresado en ACKs por segundo para cada AC primera parte, Nodo 72. Escenario 2.	75
Figura 3.29 <i>Throughput</i> expresado en ACK por segundo medidos por cada AC segunda parte, Nodo 72, Escenario 2.....	76
Figura 3.30 Tramas descartadas por cada AC, Nodo 72, Escenario 2.	78
Figura 3.31 Número de Intentos de Transmisión por cada AC, Nodo 72, Escenario 2.....	79
Figura 3.32 Tiempo Promedio que permanecen las tramas en contienda colas 1 y 2, Nodo 72, Escenario 2.	80
Figura 3.33 Tiempo promedio que permanecen las tramas en Contienda colas 3 y 4, Nodo 72, Escenario 2.	81
Figura 3.34 Ventana de Contienda para cada AC, Nodo 190, Escenario 2.....	83
Figura 3.35 Colisiones por Intento de Transmisión, Nodo 190, Escenario 2. Por los Autores. ...	84
Figura 3.36 <i>Throughput</i> expresado en ACKs por segundo para cada AC, Nodo 190, Escenario 2.....	86
Figura 3.37 Tramas descartadas por cada AC, Nodo 190, Escenario 2.	87
Figura 3.38 Número promedio de Intentos de transmisión, Nodo 190, Escenario 2.....	88
Figura 3.39 Tiempo promedio que permanecen las tramas en contienda colas 1 y 2, Nodo 190, Escenario 2.	89

Figura 3.40 Tiempo Promedio que permanecen las tramas en contienda para las colas 3 y 4,
 Nodo 190, Escenario 2.....90

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Correspondencia entre UP y AC.....	11
Tabla 1.2 Parámetros por defecto de EDCA.....	11
Tabla 2.1 Resumen de los Modelos de Teoría de Juegos en sistemas CSMA/CA	30
Tabla 3.1 Simuladores de Tráfico.....	38
Tabla 3.2 Simuladores de Red.	39
Tabla 3.3 Simuladores Integrados.....	39
Tabla 3.4 Simuladores Híbridos.	40
Tabla 3.5 Parámetros de Transmisión y Contienda	45
Tabla 3.6 Valores para cada escenario de simulación.....	43
Tabla 3.7 Valores del factor de transmisión por prioridad.....	46
Tabla 3.8 Valores de Factores de Presión por Cada AC.	46
Tabla 4.1 Código de Colores de las AC para las gráficas.....	49

LISTADO DE ACRÓNIMOS

AC	<i>Access Category</i> , Categoría de Acceso.
ACK	<i>Acknowledgement</i> , Acuse de Recibo.
AIFS	<i>Arbitration Interframe Space</i> , Espacio de Arbitraje entre Trama.
BEB	<i>Binary Exponential Back-off</i> , <i>Back-off</i> Exponencial Binario.
CCH	<i>Control Channel</i> , Canal de Control.
CRISP	<i>Cooperation via Randomized Inclination to Selfish/Greedy Play</i> , Cooperación a través de Inclinação aleatorizada al Juego Egoísta/Codicioso.
CS	<i>Carrier Sense</i> , Detección de Portadora.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión.
CTS	<i>Clear To Send</i> .
CWmin	<i>Minimum Contention Window</i> , Ventana de Contienda Mínima.
CWmax	<i>Maximum Contention Window</i> , Ventana de Contienda Máxima.
DCF	<i>Distributed Control Function</i> , Función de Control Distribuida.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo.
GT	<i>Game Theory</i> , Teoría de Juegos.
GTMA	<i>Game-Theoretic Medium Access</i> , Teoría de Juegos de Acceso al Medio.
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i> , Conjunto de Servicio Básico Independiente.

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
LLC	<i>Logical Link Control</i> , Control de Enlace Lógico.
MAC	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Networks</i> , Redes Móviles Ad Hoc.
MIB	<i>Management Information Base</i> , Base de Información de Gestión.
MLME	<i>MAC Layer Management Entity</i> , Entidad de Gestión de Capa MAC.
MOVE	<i>Mobility Model Generator for Vehicular Networks</i> , Generador de Modelo de Movilidad para Redes Vehiculares.
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i> , Unidad de Datos de Protocolo MAC.
NAV	<i>Network Allocation Vector</i> , Vector de Asignación de Red.
NE	<i>Nash Equilibrium</i> , Equilibrio de Nash.
OBU	<i>On Board Unit</i> , Unidad a Bordo.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
PCF	<i>Point Coordination Function</i> , Función de Coordinación de Punto.
PIFS	<i>PCF Interframe Space</i> , Espacio Intertrama PCF.
PLME	<i>Physical Layer Management Entity</i> , Entidad de Gestión de Capa Física.
RAG	<i>Random Access Game</i> , Juego de Acceso Aleatorio.
RIFS	<i>Reduced Interframe Space</i> , Espacio Intertrama Reducido.
RM	<i>Resource Manager</i> , Gestor de Recursos.

RSU	<i>Road Side Unit</i> , Unidad al Lado de la Carretera.
RTS	<i>Request to Send</i> , Petición para Enviar.
SAP	<i>Service Access Point</i> , Punto de Acceso de Servicio.
SCH	<i>Service Channel</i> , Canal de Servicio.
SIFS	<i>Short Interframe Space</i> , Espacio Intertrama Corto.
SNAP	<i>SubNetwork Access Protocol</i> , Protocolo de Acceso a Subred.
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility</i> , Simulación de Movilidad Urbana.
TxOp	<i>Transmission Opportunity Time Limit</i> , Tiempo Límite de Oportunidad de Transmisión.
UCT	<i>Universal Coordinated Time</i> , Tiempo Coordinado Universal.
UP	<i>User Priority</i> , Prioridad de Usuario.
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i> , Vehículo a Infraestructura.
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i> , Vehículo a Vehículo.
VANET	<i>Vehicular Ad-Hoc Network</i> , Red Vehicular Ad-Hoc.
VeINS	<i>Vehicles In Network Simulation</i> , Vehículos en Simulación de Red.
VSF	<i>Virtual Frame Scheduling</i> , Planificación de Trama Virtual.
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments</i> , Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares.
WBSS	<i>WAVE Basic Service Set</i> , Conjunto de Servicio Básico WAVE.
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , Interoperabilidad Mundial para el Acceso por Microondas.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.

WME	<i>WAVE Managment Entity</i> , Entidad de Gestión WAVE
WSA	<i>WAVE Service Advertisement</i> , Anuncio de Servicio WAVE.
WSM	<i>WAVE Short Message</i> , Mensaje Corto WAVE
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i> , Protocolo de Mensaje Corto WAVE

INTRODUCCIÓN

El acelerado incremento de la densidad vehicular verificado en calles y carreteras de todo el mundo, sumado a las problemáticas propias de la infraestructura vial, crea una gran demanda de soluciones ingenieriles. En un esfuerzo por dar cuenta de estos retos, y gracias a la evolución vertiginosa que han venido experimentando las tecnologías de comunicación inalámbrica en el transcurso de los últimos años, han sido desarrolladas las Redes Vehiculares Ad-Hoc (VANET, *Vehicular Ad-Hoc Network*).

Las VANET son un tipo de red surgidas a partir de las necesidades de conectividad, entretenimiento e información que las personas requieren durante su tránsito a bordo de un vehículo, para la mejora tanto del confort de los pasajeros durante el viaje, como de la seguridad y de la eficiencia de los sistemas de transporte vehiculares [1], [2].

En el ambiente vehicular Ad Hoc, los nodos tienen características particulares en el contexto de las redes Ad-Hoc, tales como: desplazamiento a alta velocidad, movimiento confinado al espacio de la vía, alta capacidad en cuanto a fuentes de alimentación y capacidad de procesamiento, haciendo necesaria la existencia de una serie de protocolos que gestionen la adecuada comunicación entre vehículos. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electric and Electronic Engineers*) desarrolló en el año 2010 un estándar para este tipo de comunicaciones inalámbricas, el cual se denominó: estándar para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares (WAVE, *Wireless Access in Vehicular Environments*) o también: IEEE 802.11p [3], [4].

El esquema de acceso al medio empleado en el estándar IEEE802.11p corresponde a una función de Acceso al Canal Distribuido Mejorado (EDCA, *Enhanced Distributed Channel Access*), la cual se basa en el método Acceso de Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [3].

Sin embargo, el método CSMA/CA presenta inconvenientes para afrontar situaciones críticas como por ejemplo el incremento de los nodos en la red, con la cual, puede desatar colisiones excesivas de tramas de información y un descarte de las mismas; además la gestión de los tiempos de *Back-off* después de transmisiones exitosas conlleva a una asignación injusta del medio [4].

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede identificar situaciones donde se manifiesta una interacción clara entre los nodos participan de la red, en este caso por competencia por el medio compartido. Es en esta instancia que la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*), la cual es una rama de la matemática, se puede prestar para el modelado y análisis de esta contienda en donde los participantes toman decisiones seguidos por intereses que pueden generar conflicto [5].

Inicialmente la Teoría de Juegos GT comenzó como una herramienta de estudio en el campo de la Economía, pero en años recientes ha sido adoptada en el contexto de la ciencia computacional y en el sector de los sistemas de telecomunicaciones, en donde ha dado cuenta de su versatilidad para ajustarse a los problemas que en estos entornos se suscitan. En el hecho particular del problema del acceso al medio se han gestado estudios desde la perspectiva de la Teoría de Juegos, que han convergido hacia modelos para el análisis de

distintos protocolos de acceso al medio en redes inalámbricas, entre los que se encuentra CSMA /CA [6].

A partir de lo anterior, este trabajo de grado realiza el análisis de un modelo de Teoría de Juegos para el acceso al medio a las redes VANET a través en un ambiente de simulación, además se contrasta con lo planteado en el estándar IEEE 802.11p, responsable de la gestión de acceso al medio en este tipo de redes de comunicación.

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

Capítulo I. Introduce una descripción general de los aspectos fundamentales relacionados con las redes vehiculares *ad hoc*, así mismo, hace una descripción de los estándares IEEE que rigen estas redes, de la capa MAC y de aspectos que son relevantes en el proceso de contienda por el medio compartido.

Capítulo II. Introduce los conceptos más sobresalientes de la Teoría de Juegos, adicionalmente, presenta los modelos de Teoría de Juegos enfocados hacia el estudio del método CSMA /CA.

Capítulo III. Detalla la adaptación del Modelo de Teoría de Juegos escogido hacia el entorno de las redes VANET, así mismo, describe de manera general las herramientas software disponibles para simular redes VANET y se centra en aquellas elegidas para la simulación de escenarios, además presenta los escenarios de red a simular y sus características. Además, muestra, especifica y describe las simulaciones realizadas, los parámetros a evaluar, los resultados obtenidos y su análisis.

Capítulo IV. Se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de todo el proyecto y se presentan una serie de ideas para futuros trabajos e investigaciones en este campo.

1. REDES VEHICULARES AD HOC VANET.

La comunicación entre los vehículos denominados nodos, o entre los vehículos y unidades fijas en la carretera a través de un medio inalámbrico, conforma las denominadas redes VANET. Dichas redes han surgido a partir de las necesidades crecientes de comunicación de los usuarios y los problemas inherentes de los sistemas viales, enfocadas hacia la mejora de la seguridad y la comodidad en la experiencia al conducir. Se espera que el desarrollo e implementación de dichas redes aporte a la superación de los diversos retos que implica el tráfico vehicular, así como a la introducción de nuevos servicios de telecomunicaciones en dicho ámbito.

Este tipo de redes comprenden distintos componentes para su correcto funcionamiento y operación; por un lado se encuentran los vehículos, los cuales circulan por los entramados viales y realizan la comunicación gracias a la implementación de dispositivos como [7]:

- **Unidad a Bordo (OBU, *On Board Unit*)** es un dispositivo puesto a bordo de los vehículos que gestiona los dispositivos de aplicación del usuario, maneja los protocolos de enrutamiento y acceso del nodo, haciendo posible la transmisión inalámbrica para el intercambio de información con otras OBUs o con unidades fijas en la carretera a través de tecnologías de corto o mediano alcance basados en dispositivos IEEE 802.11p.
- **Unidad de Aplicación (AU, *Application Unit*)** son aquellos dispositivos que se encargan de mostrar la información al usuario. Habitualmente se llama AU a dispositivos de usuario como *laptops*, *smarthphones*, o cualquier dispositivo que sea una interfaz hacia el usuario que se encuentre conectado a la OBU.

Los vehículos en su rol de comunicación constan de una unidad OBU y de dispositivos AU que pueden acceder a distintos servicios entre ellos el acceso a Internet a través de la conexión con las unidades al lado de la carretera (RSU, *Road Side Unit*).

- **Unidad al lado de la Carretera RSU**, es una entidad ubicada en locaciones fijas y está encargada de gestionar las conexiones entre los nodos para establecer comunicaciones bidireccionales entre ellos. También puede operar como pasarela o *Gateway* para brindar el acceso a Internet a los nodos.

Los componentes que constituyen las VANET establecen distintos enlaces que permiten a estos interactuar colectivamente en la red. Estos enlaces se denominan dominios y en el caso de las redes VANET se presentan los siguientes dominios [2] [7]:

- ❖ **Dominio en el Vehículo:** Este dominio se conforma por la OBU y las AUs presentes en el vehículo las cuales se comunican de manera bidireccional a través de cables o del medio inalámbrico mediante tecnologías de corto alcance como Bluetooth.
- ❖ **Dominio Ad Hoc:** Este se refiere a la comunicación inalámbrica entre los vehículos equipados con las OBUs o aquella comunicación de los nodos con las estaciones RSU. En primera instancia los nodos establecen una comunicación entre sí, de manera descentralizada creando comunicaciones directas vehículo a vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*) de un único salto, y si no es posible la comunicación directa, se crea un enlace

Multi salto a través de otros vehículos. Por otra parte el enlace de los vehículos con las RSU, permite incrementar el alcance de la comunicación en el envío y recepción de un nodo a otro o también beneficiarse de la habilidad de las RSU para procesar aplicaciones especiales formando con esto un enlace de los vehículos con la infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure*).

- ❖ **Dominio de Infraestructura:** Las RSU se pueden conectar a redes de acceso inalámbrico como *hotspots* equipados con tecnología Wi-Fi y otras tecnologías como WiMAX, 3G o 4G y con infraestructura cableada que soporte el acceso a Internet, permitiendo a las OBU y/o a las mismas RSU acceder a este servicio, brindando soporte importante para la conectividad de los nodos en movimiento, con el objetivo de extender la cobertura de la red VANET.

La figura 1.1 muestra un ambiente VANET con los distintos dominios de red.

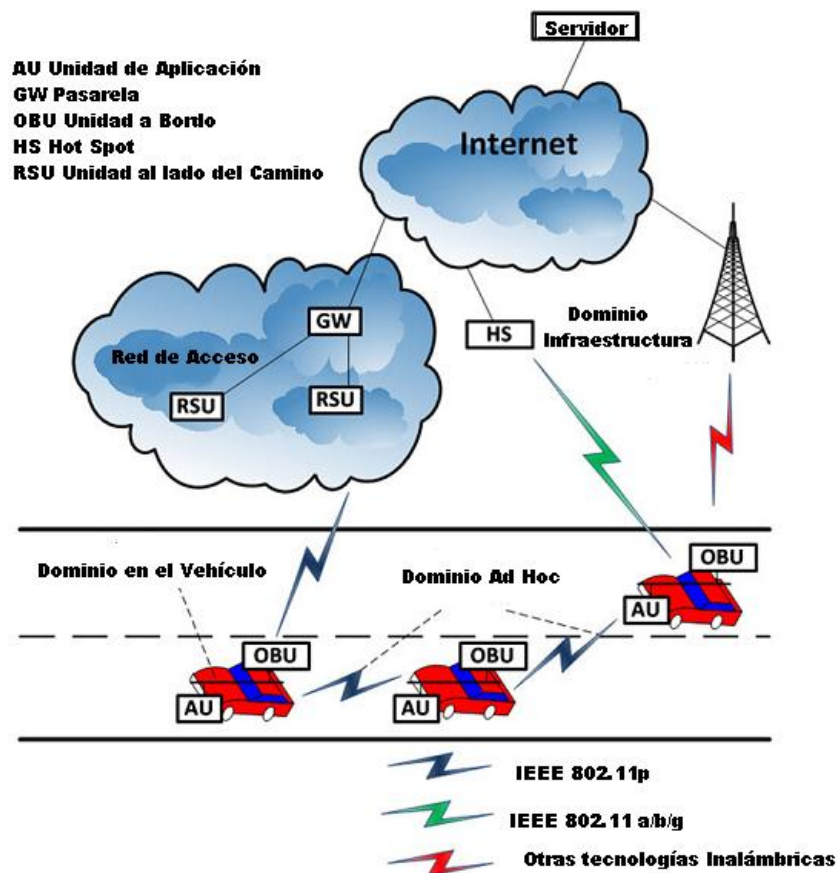


Figura 1.1 Red VANET y sus distintos dominios de red. Adaptada de [7]

La tecnología de las redes vehiculares se encamina hacia el mejoramiento del confort y de la seguridad al momento de conducir, por ende entre las esferas en las que la tecnología VANET proporciona accionar se encuentran [8]:

- **Alertas de accidente:** A través de sistemas de comunicación inalámbricos, es posible alertar acerca de accidentes a los vehículos que se encuentran circulando en un sector. Esto permite evitar los accidentes en cadena en autopistas de alta velocidad, ayuda a los conductores a encontrar rutas seguras y permite una mejor reacción de cuerpos de rescate.
- **Información actualizada acerca de tráfico vehicular¹:** Con lo cual se consigue agilizar el flujo de los vehículos.
- **Comunicación específica entre vehículos:** Facilita la coordinación de caravanas de vehículos o el seguimiento de un vehículo en particular.
- **Acceso inalámbrico a asistencia técnica:** A través de la red VANET los vehículos pueden mantener información actualizada acerca del vehículo en términos técnico-mecánicos y acceder a servicios de asistencia en caso de accidente o falla del vehículo.
- **Información relacionada con entretenimiento:** Servicios de información general, conectividad a Internet, etc.

Los dispositivos que constituyen las redes VANET deben operar en el contexto de una red en condiciones muy particulares en términos de topología, recursos físicos, movilidad, etc. A continuación se resaltan algunas características importantes inherentes a las redes VANET [8]:

- La topología cambia rápidamente en el tiempo.
- La topología se encuentra confinada por la forma física de la infraestructura vial.
- Alta capacidad de procesamiento.
- Alta capacidad en cuanto a potencia y baterías de alimentación.
- Ancho de banda de transmisión condicionado por la velocidad de desplazamiento de los vehículos.
- Alta probabilidad de transmisión simultánea de información por causa de eventos externos.
- Servicios de seguridad de la información limitados por la continua entrada y salida de nodos de la red.

1.1. ESTÁNDARES IEEE 1609 Y EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P

La familia de estándares IEEE 1609, conocida como Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares (WAVE, *Wireless Access in Vehicular Environments*), especifica las recomendaciones para el funcionamiento de las comunicaciones inalámbricas en ambientes vehiculares [9]. El estándar fundamental de dicha familia es el estándar 802.11p el cual hace

¹ Atascos, reparaciones en la vía, rutas alternas, estado de las vías, semáforos.

referencia a la capa física y a la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Media Access Control*). La Figura 1.2 ilustra la relación entre el estándar 802.11p y la familia de estándares IEEE 1609 [10].

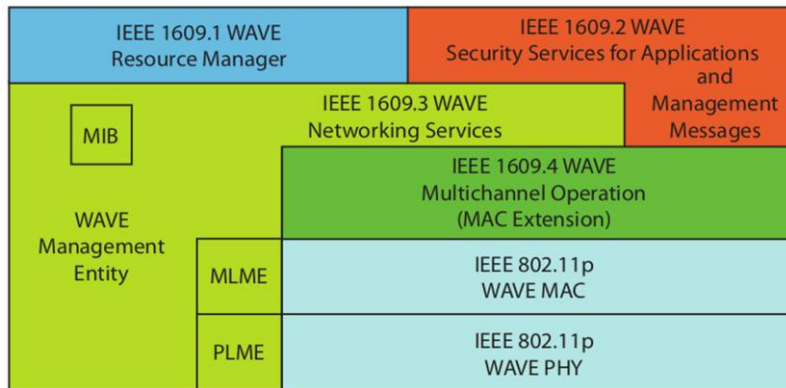


Figura 1.2 Familia IEEE 1609 y el estándar IEEE 802.11p. Tomado de [10].

Tal como se aprecia en la figura 1.2, WAVE proporciona una pila de protocolos mejorada para la transmisión de información en ambientes vehiculares, tanto en el plano de datos como en el plano de gestión.

El estándar IEEE 1609.1 define el funcionamiento de una aplicación para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares denominada Gestor de Recursos (RM, *Resource Manager*), cuyo papel es realizar la comunicación entre aplicaciones externas a la red y las OBU, para lo cual se vale de las RSU. Esta aplicación se comporta como una capa de aplicación.

El estándar IEEE 1609.2 define formatos seguros de mensajes así como modos de procesamiento de dichos mensajes para información de gestión y aplicación.

El estándar IEEE 1609.3 describe las funcionalidades de gestión presentes en WAVE para las cuales define una Entidad de Gestión WAVE (WME, *WAVE Management Entity*) encargada de manejar peticiones de servicio provenientes de capas superiores, monitorear mensajes de gestión provenientes de otras estaciones y actualizar la Base de Datos de Información de Gestión (MIB, *Management Information Base*), entre otras funciones. La WME realiza funciones de gestión en la capa MAC y la capa física mediante la Entidad de Gestión de la Capa MAC (MLME, *MAC Layer Management Entity*) y la Entidad de Gestión de la Capa Física (PLME, *Physical Layer Management Entity*).

En el plano de datos, WAVE especifica el uso del protocolo Internet versión 6, y soporta el uso de protocolos de transporte como UDP y TCP, así como la transmisión de información en forma de Mensaje corto WAVE (WSM, *WAVE Short Message*) para el cual se define en el estándar IEEE 1609.3 un Protocolo para Mensajes Cortos WAVE (WSMP, *WAVE Short Message Protocol*). El Estándar IEEE 1609.3 define que una implementación de servicios de red debe soportar IPv6 o WSMP, o ambos [11].

Se debe resaltar que para el caso de información WSMP, la capa superior que realiza la petición para transmisión de información define la prioridad de la misma mediante la primitiva

correspondiente en cada Punto de Acceso al Servicio (SAP, *Service Access Point*). Por el contrario, para el caso de información IP la prioridad se encuentra especificada en la MIB.

El estándar IEEE 1609.4 define una extensión de la capa MAC empleada para la gestión de canales múltiples en las comunicaciones inalámbricas en ambientes vehiculares.

La capa física en WAVE es una adaptación de las especificaciones del estándar IEEE 802.11a basada en Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), para la cual el estándar IEEE 1609.3 propone una Entidad de Gestión de la Capa Física PLME.

1.1.1. Capa MAC en IEEE 802.11p

Las especificaciones para la capa MAC contenidas en el estándar 802.11p constituyen el centro de atención del presente trabajo. La figura 1.3 ilustra el modelo básico de referencia para acceso inalámbrico en ambientes vehiculares [11].

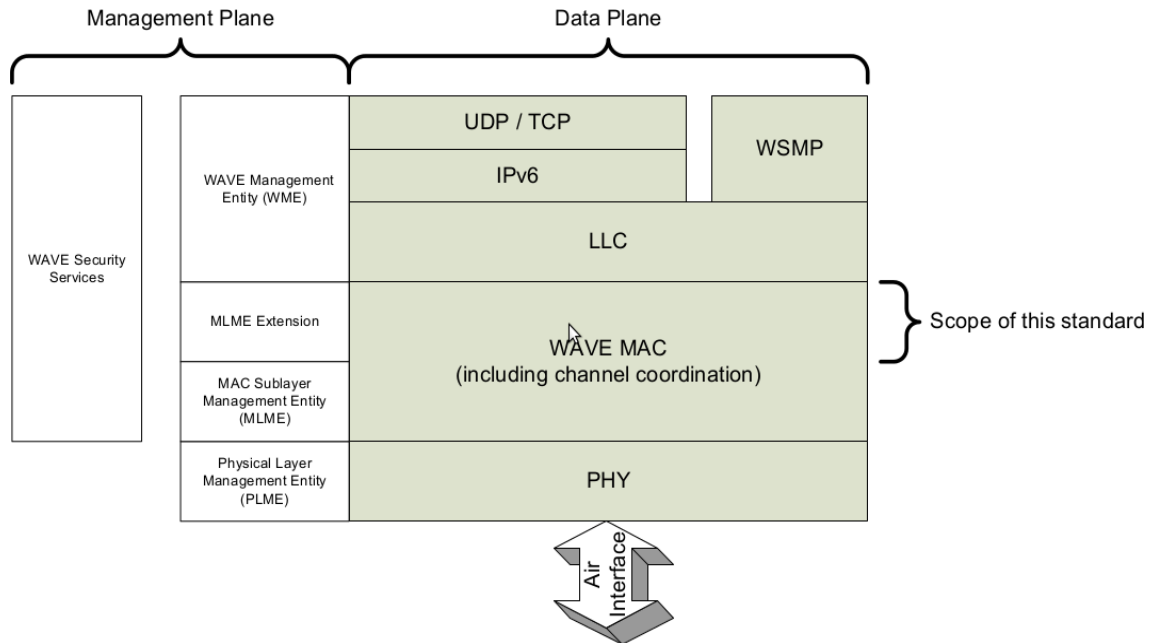


Figura 1.3 Modelo básico de referencia para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares. Tomado de [11].

La capa de Control del Enlace Lógico (LLC, *Logical Link Control*) recibe de la capa superior peticiones de transmisión de paquetes de información del Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*) y del Protocolo WSMP, los cuales son identificados gracias al campo Ethertype, que se encuentra en el encabezado del protocolo de acceso a subred (SNAP, *SubNetwork Access Protocol*).

La capa LLC entrega a la capa MAC la información a ser transmitida a través de las primitivas MAC-UNITDATA.request y MAC-UNITDATAAX.request, para información IP y WSMP respectivamente. A continuación la MLME enruta la información hacia una cola de transmisión y un canal de transmisión de acuerdo con la información recibida por medio de la primitiva si se

trata de información WSM, o de acuerdo con los datos asociados a cada usuario si se trata de información IP. Dicho proceso es realizado en el marco de la arquitectura interna de transmisión de la capa MAC de WAVE, basándose en las especificaciones del estándar IEEE 802.11 [11].

1.1.2. Canal de Control y Canal de Servicio (CCH y SCH)

Como ilustra la Figura 1.4, la capa MAC de WAVE emplea varias instancias de la entidad MAC especificada en el estándar IEEE 802.11p: una para el Canal de Control (CCH, *Control Channel*), el cual puede manejar información WSM y hasta seis (2 en la ilustración) para cada Canal de Servicio (SCH, *Service Channel*) a través del cual se puede transmitir información tanto de tipo WSM como de tipo IP [12].

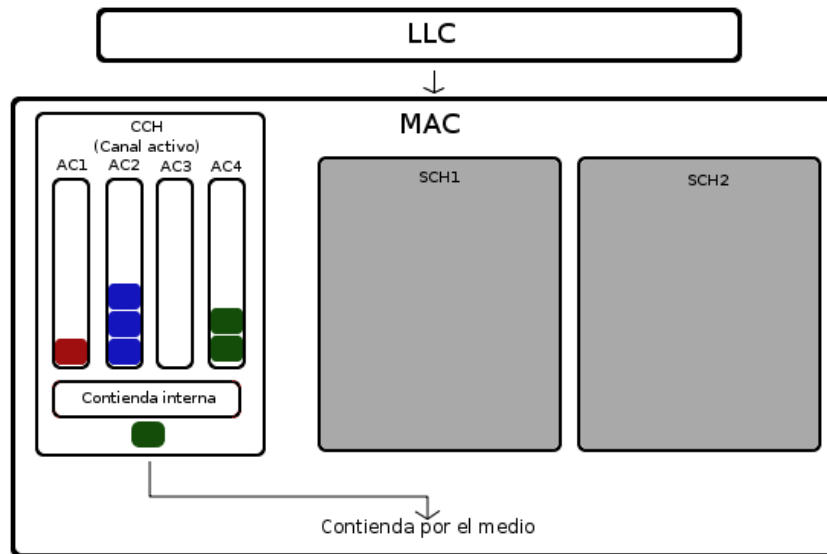


Figura 1.4 Canal de Control y los Canales de Servicio de la capa MAC. Por los Autores.

El Canal de Control se destina a la transmisión de información de alta prioridad e información de gestión. Por su parte los canales de servicio son empleados para la transmisión de información de prioridad reducida proveniente de las capas superiores [12].

El estándar 1609.4 define diversos modos de uso de los canales CCH y SCH.

- Uso solamente del canal de control CCH.
- Uso solamente de algún canal de servicio SCH.
- Uso alternado del canal de control CCH con uno o varios canales de servicio SCH.
- Uso simultáneo del canal de control CCH y algún canal de servicio SCH, para lo cual se requiere un dispositivo con más de una interfaz física.

El primer y segundo modo de uso de los canales no requiere de un procedimiento de sincronización de tiempo.

En el tercer modo, el canal de control y los canales de servicio operan de forma alternada en forma de intervalos de 50ms de duración. Tras un intervalo de CCH sigue un intervalo para algún SCH y, nuevamente, un intervalo CCH. Se conoce como *Sync interval* al intervalo de 100ms repetitivo compuesto por un intervalo de CCH seguido de un intervalo de SCH. Cada vez que se cambia de canal se utiliza un intervalo de guarda de 4ms de duración [13].

Para la coordinación de los intervalos, se recurre a una referencia global de tiempo: la Hora Coordinada Universal (UCT, *Universal Coordinated Time*) a la cual es posible acceder a través de un sistema de navegación satelital [13]. El uso de esta referencia de tiempo se ilustra en la Figura 1.5.

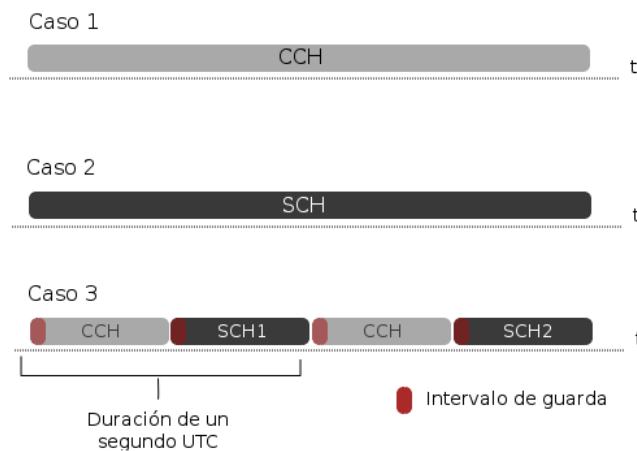


Figura 1.5 Modos de Uso del Canal de Control y los Canales de Servicio. Por los Autores.

Al inicio de cada intervalo de CCH todas las estaciones deben sintonizar la frecuencia radio correspondiente a dicho canal. Dicha operación corresponde a la MLME, la cual realiza esa tarea a través de las primitivas correspondientes.

De acuerdo con el estándar WAVE, las estaciones pueden transmitir información a través de la red en el contexto de un Conjunto de Servicios Básicos WAVE (WBSS, *WAVE Basic Service Set*), el cual es un Paquete de Servicios Básicos Independiente (IBSS, *Independent Basic Service Set*) establecido entre las OBU en la comunicación Ad hoc inalámbrica. Una estación que establece un WBSS es llamada "proveedor" y un nodo que accede al servicio es llamado "usuario". La estación proveedora del servicio debe enviar un mensaje *Broadcast* en el CCH que contiene un Anuncio de Servicio WAVE (WSA, *WAVE Service Advertisement*) en el cual se encuentra información acerca del servicio WAVE y acerca de los parámetros de red necesarios para unirse al WBSS.

Los nodos que desean iniciar un WBSS monitorean el medio con el objeto de seleccionar un SCH poco congestionado. El estándar no aporta mayor información acerca del modo en que las estaciones realizaran dicha estimación y constituye un campo de investigación [14]. Los nodos deben escuchar todos los anuncios acerca de servicios WBSS lanzados en el CCH para

conocer los parámetros asociados a cada uno. Si un nodo desea unirse a un WBSS, sintoniza el SCH usado por dicho servicio, empleando los parámetros anunciados [14].

En los primeros dos modelos de uso de los canales, las estaciones sintonizan de forma continua la frecuencia correspondiente al canal. Así mismo en el cuarto modo, se sintonizan 2 frecuencias de forma continua y simultánea asignando las interfaces físicas a cada frecuencia de canal.

En la Figura 1.6 se muestran diversos parámetros asociados a cada canal, así como el tipo de aplicación que hace uso del mismo. Este orden permite que la red opere con ancho de banda diferenciado para cada canal de acuerdo con el grado de importancia de la información que maneja

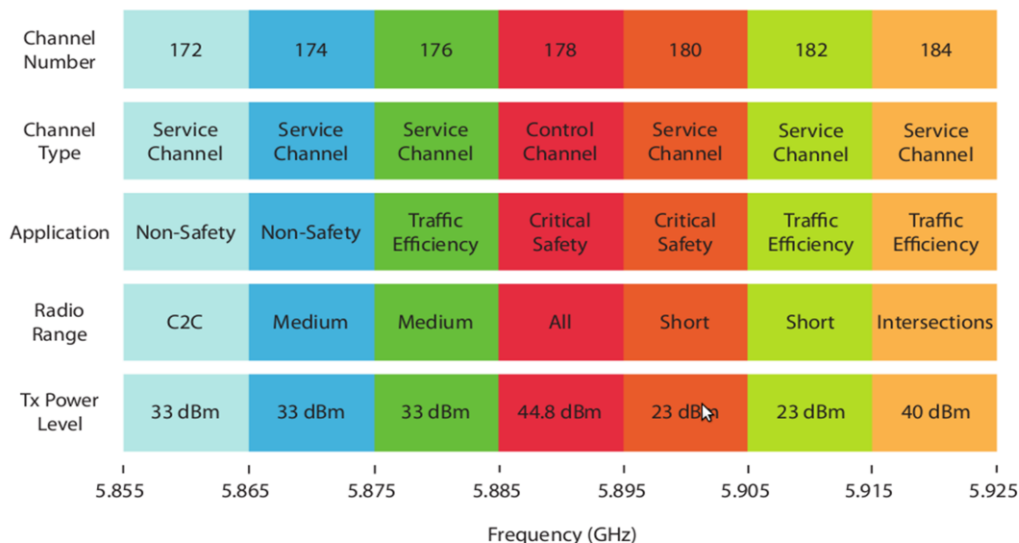


Figura 1.6 Rango de frecuencia de CCH y SCH. Tomado de [10].

1.1.3. Categorías de Acceso

WAVE soporta hasta 8 niveles de prioridad para las aplicaciones. La cola de transmisión hacia la cual es enrutada la información al llegar a la capa MAC está asociada a una Categoría de Acceso (AC, *Access Category*), la cual se refiere al nivel de prioridad de la información que maneja. El estándar 802.11p define 4 categorías de acceso que representan los 4 niveles de prioridad de tramas que maneja la capa MAC, la cual ordena las tramas mapeando el campo Prioridad de Usuario (UP, *User Priority*) contenido en la primitiva proveniente de la capa superior. La Tabla 1.1 muestra la correspondencia entre UP y AC.

Tabla 1.1 Correspondencia entre UP y AC. Adaptada de [15].

UP	Designación (802.1D)	AC	Designación informativa
1	BK	AC_BK	Background
2	---	AC_BK	Background
0	BE	AC_BE	Best Effort
3	EE	AC_BE	Best Effort
4	CL	AC_VI	Video
5	VI	AC_VI	Video
6	VO	AC_VO	Voice
7	NC	AC_VO	Voice

Cada categoría de acceso se comporta como una estación autónoma empleando una versión mejorada de la Función de Control Distribuida (DCF, *Distributed Control Function*) definida por el estándar 802.11 para cada estación. Dicha función, denominada Función de Acceso al Canal Distribuida Mejorada (EDCA, *Enhanced Distributed Channel Access*) maneja parámetros propios en cuanto a contienda y a transmisión, los cuales están relacionados con el nivel de prioridad de la AC [11].

Los parámetros que fija cada EDCA según la categoría de acceso y que aparecen asociados a sus respectivos valores en la tabla 1.2 son:

- Número de Espacio de Arbitraje Entre Tramas (AIFSN, *Arbitration Interframe Space Number*).
- Ventana de Contienda Mínima (CWmin, *Minimum Contention Window*).
- Ventana de Contienda Máxima (CWmax, *Maximum Contention Window*).
- El tiempo durante el cual una estación puede transmitir tras obtener una oportunidad de transmisión (TxOP, *Transmission Opportunity*).

Tabla 1.2 Parámetros por defecto de EDCA. Adaptado de [11].

AC	CWmin	CWmax	AIFSN
AC_BK	aCWmin	aCWmax	9
AC_BE	aCWmin	aCWmax	6
AC_VI	$(aCWmin+1)/2-1$	aCWmin	3
AC_VO	$(aCWmin+1)/4-1$	$(aCWmin+1)/2-1$	2

Los valores aCW_{min} y aCW_{max} son fijados a partir del estándar IEEE 802.11e en: $CW_{min}=15$; $CW_{max}=1023$ [16].

El valor $TxOp$ es fijado en 0 por defecto para las redes VANET. Bajo esa configuración, una estación puede transmitir durante la duración de una Unidad de Datos de Protocolo de la Capa MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Unit*).

Tras el enrutamiento de la información, las colas de transmisión que tengan una trama a la espera compiten internamente entre sí, empleando EDCA, por la oportunidad de transmitir, la cual es asignada a la cola con AC de mayor prioridad. Una vez ganada la contienda interna, la trama pasa a competir con tramas de otras estaciones por el acceso al medio de transmisión inalámbrico.

1.1.4. Detección del medio

La lectura del medio se realiza mediante el mecanismo de Escucha de la portadora (CS, *Carrier Sense*). Dicho mecanismo se encuentra distribuido entre la capa MAC y la capa física.

La capa MAC proporciona un CS virtual a partir de la información que posee acerca de la duración de las tramas, información obtenida gracias al intercambio de tramas RTS (*Request to Send*) y CTS (*Clear to Send*) o de las cabeceras de las tramas. Dicho CS virtual es denominado Vector de Asignación de red (NAV, *Network Allocation Vector*).

La capa física proporciona un CS físico, es decir, una escucha directa del estado del medio. Si el CS virtual, el CS físico o ambos reportan un medio ocupado, el medio es asumido en estado ocupado. Si ningún CS reporta medio ocupado, el medio es asumido libre.

1.1.5. Contienda por el Medio

El modo en que las estaciones compiten por el acceso al medio de transmisión compartido es importante puesto que de ello depende que las transmisiones no colisionen entre sí. Una colisión ocurre cuando dos estaciones realizan un intento de transmisión simultáneamente y la interferencia resultante impide a la estación receptora recibir adecuadamente el mensaje. Dicho escenario es posible cuando una estación no sabe, que el medio ha sido ocupado por otra estación debido al retardo de propagación o a que se encuentra fuera del área de cobertura.

El estándar 802.11p define que el método de acceso fundamental para la capa MAC 11p es la función EDCA, la cual es una versión mejorada de la DCF. Dicha EDCA se basa en el método de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*) definida en el estándar IEEE 802.11 [4].

La EDCA hace uso de diferentes tipos de Espacio entre Tramas (IFS, *Interframe Space*). Dichos IFS son tiempos de espera ubicados entre tramas transmitidas consecutivamente (No necesariamente por la misma estación) cuya duración diferenciada garantiza que una trama accederá al canal de acuerdo con la prioridad asociada a la misma por la entidad EDCA. A continuación se describen aquellas IFS que se usan en VANET.

- Espacio Corto entre Tramas (SIFS, *Short Interframe Space*): es el espacio más corto entre tramas transmitidas por diferentes estaciones. Puede ser empleado cuando una

estación necesita permanecer transmitiendo puesto que usarlo garantiza ventaja sobre cualquier otra estación. Es usado principalmente para la transmisión de ACK, convirtiéndose así en tramas de la más alta prioridad, puesto que de su llegada a tiempo depende que la estación transmisora detecte una colisión o una transmisión exitosa.

- Espacio entre Tramas de la DCF (DIFS, *DCF Interframe Space*): Es el tiempo entre tramas básico empleado por estaciones operando bajo la DCF. Una estación que desea transmitir una nueva trama considera que el canal se encuentra desocupado si este ha permanecido así durante un tiempo igual al DIFS.
- Espacio de Arbitraje entre Tramas (AIFS, *Arbitration Interframe Space*): Es el espacio entre tramas empleado para el funcionamiento de EDCA en lugar del DIFS. La duración del AIFS depende del nivel de prioridad de la información que se va a transmitir y se fija a partir de los parámetros de la categoría de acceso. Esto implica acceso diferenciado al canal asociado al contenido de la trama.

A partir del AIFSN (Tabla 1.2), cada AC calcula su AIFS correspondiente según la ecuación (1.1) [15]:

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime, \quad (1.1)$$

donde:

- $AIFS[AC]$ es el espacio de arbitraje entre ramas para cada AC.
- $AIFSN[AC]$ corresponde al número de espacio de arbitraje entre tramas para cada AC.
- $aSlotTime$ es la duración de un *slot* de tiempo.
- $aSIFSTime$ es la duración de un SIFS.

El método CSMA/CA implica que las estaciones que participan de la red deben realizar un proceso de *Back-off* antes de intentar transmitir con el objetivo de reducir la probabilidad de colisión. En un proceso de *Back-off*, una estación que desea transmitir una trama pospone dicha transmisión hasta un momento posterior determinado por un tiempo de *Back-off* calculado mediante algún algoritmo de resolución. Así, el tiempo de *Back-off* sumado con el IFS, constituyen el tiempo real entre tramas transmitidas sobre el canal de manera consecutiva.

Una estación no ejecuta un proceso de *Back-off* si el canal ha estado desocupado durante un tiempo mayor al DIFS (O a su AIFS en el caso de EDCA) cuando la capa MAC dispone de una nueva trama lista para ser transmitida tal como se ilustra en la figura 1.7 (a).

Por el contrario como se ilustra en la figura 1.7 (b), una estación ejecuta un proceso de *Back-off*, siempre que se dispone a retransmitir una trama que ha colisionado, por cuanto una colisión implica que varias estaciones intenten acceder al medio simultáneamente.

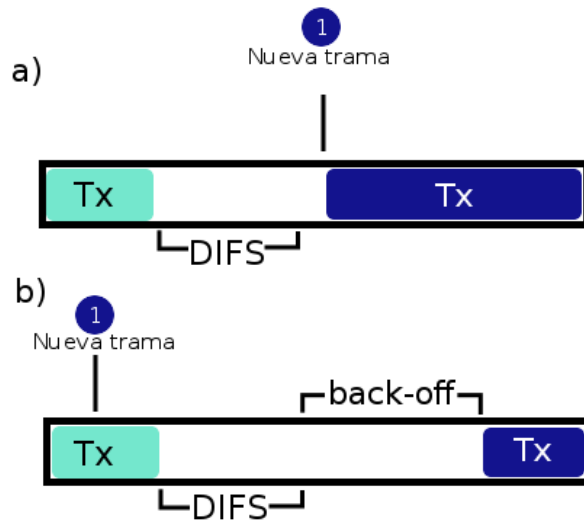


Figura 1.7 Invocación del Proceso de *Back-off*. Por los Autores.

Todas las medidas de tiempo descritas tienen como referencia las primitivas emitidas por la capa física: PHY-TXEND.confirm, PHY-TXSTART.confirm, PHY-RXSTART.indication, y PHY-RXEND.indication [11].

La EDCA descrita en el estándar IEEE 802.11p ejecuta un proceso de back-off conocido como *Back-off* Binario Exponencial.

1.1.6. Back-off binario exponencial

El proceso de *Back-off* Binario Exponencial (BEB, *Binary Exponential Back-off*) realizado por una estación que compite por el medio empleando la EDCA se describe a continuación:

- Cada estación fija su contador en un valor entero aleatorio en el rango $[0, CW_{min}]$.
- Cada estación escucha el medio de transmisión; por cada intervalo de tiempo que el medio es escuchado libre, la estación decrementa en 1 su contador de *Back-off*. Por cada intervalo de tiempo que el medio es escuchado ocupado, la estación pausa su contador de *Back-off*; una estación reanuda su contador una vez que ha escuchado el medio libre durante un AIFS.
- Si el contador de *Back-off* llega a 0, la estación inicia la transmisión.

La figura 1.8 ilustra un escenario en el que 3 estaciones que compiten por acceder al medio de transmisión ejecutan un proceso de *Back-off*. Durante el periodo (a) las estaciones decrementan progresivamente sus contadores de *Back-off*. La estación 2 es la primera en alcanzar el valor 0 en su contador y por lo tanto inicia la transmisión de una trama de duración (b), periodo de tiempo durante el cual las estaciones 1 y 3 pausan sus contadores, los cuales reinician su marcha durante el periodo (c), cuando el canal se encuentra desocupado. Esta vez la estación 3 alcanza el valor 0 en su contador y transmite una trama de duración (d), mientras la estación 1 pausa una vez más su contador. Finalmente durante el periodo (e) en el que el

canal de transmisión está desocupado el contador de la estación 1 llega a 0 y realiza la transmisión de una trama.

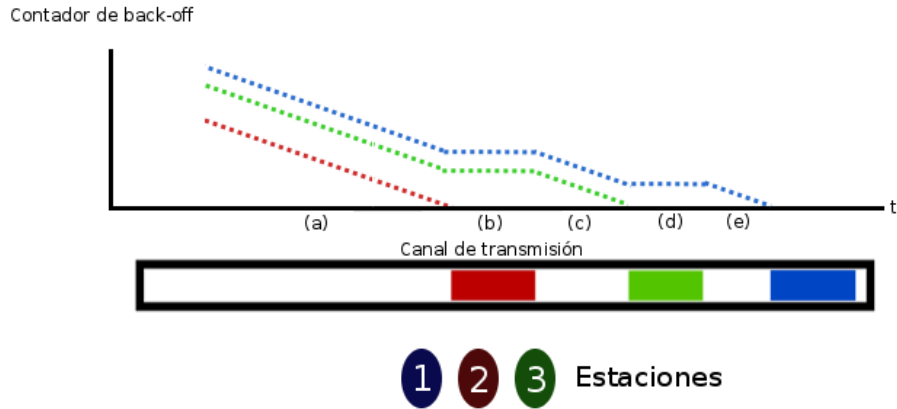


Figura 1.8 Proceso de *Back-off*. Por los Autores

Una estación que recibe exitosamente una trama, transmite un ACK para confirmar la correcta recepción de la misma. Una estación que transmite una trama espera la llegada del ACK correspondiente durante un tiempo calculado mediante la ecuación (1.2). Las estaciones que transmiten una trama detectan una colisión cuando, finalizado el tiempo de espera de un ACK, este no ha llegado. Cabe resaltar que los mensajes de *Broadcast* transmitidos en el contexto de una red VANET no generan un ACK.

$$timeoff(ACK) = 2\delta + \mu + SIFS + duración(ACK), \quad (1.2)$$

donde:

- δ es el retardo de propagación máximo calculado a partir del área de cobertura de la estación.
- μ es el retardo de procesamiento de la trama.
- *SIFS* es la duración del espacio corto entre tramas.
- *duración(ACK)* es el tiempo de duración del ACK.

Una estación que colisiona durante la transmisión, calcula nuevamente un tiempo de *Back-off* tras duplicar el valor de su CW. Esto se repite hasta alcanzar el CWmax. Tras 7 intentos de transmisión fallidos, el paquete es descartado. Por el contrario, una estación que al recibir un ACK detecta una transmisión exitosa, fija de nuevo su CW en CWmin.

Debido a que las condiciones de congestión de la red son conocidas por la estación a través de una señal de naturaleza binaria (Transmisión colisionada, transmisión exitosa), y a que responde a dicha señal incrementando exponencialmente su ventana de contienda (O reiniciándola), este proceso de *Back-off* recibe el nombre de *Back-off* binario exponencial.

La Figura 1.9 ilustra la transmisión de una trama por parte de la estación 1 y del ACK correspondiente por parte de la estación receptora. En dicha figura, tras esperar durante un tiempo AIFS, la estación 1 inicia un proceso de *Back-off*, cuyo conteo es interrumpido por la transmisión Tx3. Tras esperar nuevamente un tiempo AIFS la estación 1 continúa su conteo hasta completarlo, tras lo cual accede al canal e inicia la transmisión de una trama. La estación 2, destinataria de la trama, espera un tiempo SIFS, y transmite un ACK

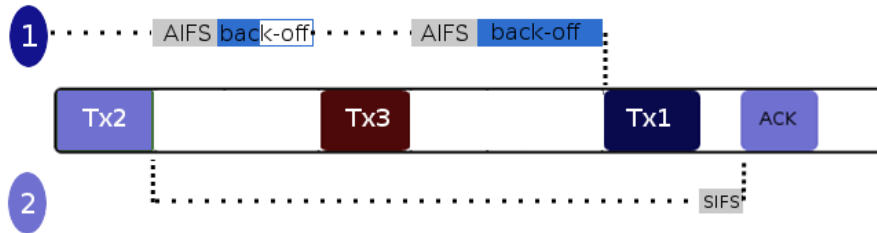


Figura 1.9 Contienda por el Medio. Por los Autores.

Dada una situación de alta congestión del canal, una estación que detecta sucesivas colisiones de sus intentos de transmitir una trama, amplía exponencialmente el tamaño de su ventana de contienda hasta conseguir una transmisión exitosa. Así, el tiempo que tarda una estación en transmitir una trama resulta de la suma de los *Back-off* correspondientes a los sucesivos intentos de transmisión y los AIFS y tiempos de espera de ACK asociados a los mismos. Una vez que la trama es transmitida, el proceso se repite puesto que la ventana de contienda regresa a su valor inicial pero las condiciones de congestión permanecen. Este comportamiento oscilante de dicha ventana resulta en largos tiempos de espera antes de conseguir una transmisión exitosa y, por consiguiente, un uso ineficaz del ancho de banda.

En un escenario en que numerosas estaciones tienen más de una trama lista para ser transmitida y se presentan colisiones entre sus intentos de transmisión, la estación que consigue transmitir exitosamente fija su ventana de contienda en el valor mínimo inicial mientras que la ventana de contienda de las demás estaciones permanece en un valor elevado debido a las sucesivas colisiones de las que se habló antes. De este modo, la EDCA implica que la estación que transmite primero obtiene una ventaja sobre las demás para la transmisión siguiente.

2. NOCIONES BÁSICAS Y MODELOS DE TEORÍA DE JUEGOS

La Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*) es una rama de la matemática, que enfoca su análisis hacia el estudio de modelos matemáticos sobre el conflicto y cooperación entre agentes racionales e inteligentes, racionalidad reflejada en la preferencia que tienen los jugadores hacia ciertos resultados que se suscitan [17]. Aquellos agentes pueden ser individuos, colectividades o grupos, organizaciones, o cualquier combinación de estas [18].

La Teoría de Juegos (GT) puede ser considerada como una disciplina que se adapta a distintos escenarios para la resolución de problemas, convirtiéndola en una herramienta muy versátil, ya que no solo se ha aplicado en el área de la Economía donde se originó, sino también en ciencias como la psicología, sociología, política y biología; entre otras, manifestando resultados altamente favorables [17], [18]. Un compendio de situaciones que pueden modelarse a través de la Teoría de Juegos (GT) demuestran la adaptabilidad a distintos contextos; por ejemplo: empresas compitiendo por un negocio, candidatos políticos compitiendo por votos, animales peleando por territorio o por alimento, ofertantes en una subasta, etc. [19]. En el área de las telecomunicaciones, por ejemplo, se encuentran situaciones en las que se presenta competencia por un recurso limitado como la utilización del espectro, el consumo de potencia, el control de congestión y admisión, entre otras [20].

Desde el punto de vista de la Teoría de Juegos, toda interacción en la que se presente conflicto de intereses, en donde las decisiones de unos individuos afecten las decisiones de otros se modela como un juego. El juego está conformado por:

Los participantes o jugadores: son aquellas entidades que participan en el Juego, con la particularidad de que su comportamiento dentro de la interacción se realiza con base en la racionalidad, ya que los jugadores son conscientes de sus alternativas y tienen claras sus preferencias.

Las acciones: son las distintas opciones disponibles que pueden tomar los participantes en su proceso de interacción con los demás jugadores. Las acciones que elija cada jugador (estrategias), respecto a sus oponentes, definen el curso del juego, y por ende los resultados del mismo.

El beneficio: pago, recompensa o utilidad que se obtiene como resultado del Juego conocido como *payoff*, mide el grado de rentabilidad que cada uno de los jugadores recibe al ejecutar o llevar a cabo determinada estrategia

2.1. TIPOS DE JUEGOS

Juego Cooperativo: es un tipo de juego en el que los participantes de éste realizan acuerdos vinculantes, en pos de mejorar los beneficios obtenidos por todos los jugadores. En el campo de las telecomunicaciones se puede aplicar este modelo de juego para plantear entornos de cooperación entre los participantes del juego, por ejemplo en la gestión de acceso al medio en redes inalámbricas.

Juego No Cooperativo: en este tipo de juego se modelan situaciones en las que se presenten comportamientos egoístas por parte de los jugadores, que buscan maximizar su beneficio propio. Así, el análisis de la interacción se enfoca hacia la toma de decisiones individuales [20].

Los juegos además se pueden clasificar en ciertas categorías dependiendo de algunos criterios:

- Si los jugadores hacen sus jugadas simultáneamente:

Juego Estático: Los jugadores hacen la elección de sus estrategias de manera simultánea, desconociendo las elecciones que han realizado sus oponentes [15].

La representación de este tipo de juegos se realiza mediante una matriz o tabla de juego, denominada Forma Estratégica o Forma Normal del juego. En este tipo de representación se plantea los pagos o *utilidades* de los jugadores en función del conjunto de acciones disponibles para estos. La notación para identificar este tipo de juegos se muestra en la ecuación 2.1 [21]:

$$G = (\mathcal{N}, \{A_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}}), \quad (2.1)$$

donde:

- $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ representa el conjunto de los participantes del Juego.
- A_i es el conjunto de estrategias o acciones posibles del jugador i -ésimo.
- u_i simboliza el *payoff* o la utilidad obtenida por el jugador i -ésimo debido a la elección de la estrategia $a_i \in A_i$.

Juego Dinámico: La elección de las acciones empleadas en el juego por parte de los jugadores incluye una sincronización de los movimientos de los jugadores, es decir, involucra situaciones estratégicas en las que se concibe un estricto orden de juego.

Para representar este tipo de juego se hace uso de Diagramas de Árbol, conocidos como Forma Extensiva del Juego. Los diagramas de árbol indican de manera más detallada las posibles acciones que pueden realizar los jugadores, así como, los resultados que se obtienen en el juego [21]. En estos diagramas se plantea una visión más descriptiva del juego, ya que se trazan los movimientos de los jugadores teniendo en cuenta un orden en el tiempo.

La notación para definir de manera formal el juego se realiza mediante la expresión planteada en la ecuación 2.2 [21].

$$G = (\mathcal{N}, V, v_{root}, \pi, \{V_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}}), \quad (2.2)$$

donde:

- $N = \{1, 2, \dots, N\}$ representa el conjunto de los jugadores.
 - (V, v_{root}, π) hace referencia al diagrama de árbol. En este se nota:
 - V como el conjunto de nodos (o vértices del árbol).
 - v_{root} es el identificador del nodo raíz.
 - π es la función predecesora. Es aquella función que asigna a cada nodo no inicial, la acción que lo conecta con su nodo predecesor.
 - V_i es una partición de V que corresponde a una ruta sobre el árbol.
 - u_i corresponde a la utilidad del jugador i-esimo, dada por las elecciones efectuadas por los jugadores.
- Si se tiene información o no acerca del estado del Juego.

Juego de Información Completa: En un Juego de información Completa, la información relacionada de utilidad, pagos y estrategias es de común conocimiento para los integrantes del Juego. Por lo que cualquier cambio en el estado del juego será detectado por todos los integrantes del mismo.

Juego de Información Incompleta: Los jugadores conocen de manera parcializada la información acerca del estado del juego, lo que significa que un cambio en el estado del juego obliga a los jugadores a tomar decisiones de acuerdo al conocimiento parcial que poseen del juego.

- De acuerdo a si las ganancias en el juego encuentran un balance.

Juego Suma Cero: Es aquel en el que las ganancias de un jugador representan pérdidas en igual cuantía para su contrincante, es decir, la distribución de las ganancias del juego se ven balanceadas.

Juego No Suma Cero: En contraste con el juego de suma cero, este tipo de juego no requiere que la suma de las utilidades netas del juego resulte en cero.

Si se considera una representación desde la Teoría de Juegos (GT) con un enfoque más real del escenario de juego, en el que se tiene en cuenta que el juego puede realizarse un número contable o incontable de veces, surgen de acuerdo a esta premisa otros estamentos de clasificación de los juegos:

Juego Repetido Finitamente: Un juego base que se denomina Juego de Etapa (*Stage Game*), se repite un número de veces finito [22].

Juego Repetido Indefinitamente: Corresponde a un tipo de juego, en el cual, el juego base o Juego de Etapa se repite un número de veces infinito o un número de veces finito pero incierto.

Juego estocástico: corresponde a una generalización de los juegos repetidos. Se define como una colección de juegos en forma normal, en la que los jugadores juegan repetidamente los juegos de esta colección, donde cualquier interacción dada depende probabilísticamente de jugadas y acciones tomadas previamente por los participantes del juego [22].

Juego no estocástico: Los juegos no estocásticos pueden ser ejecutados más de una vez, sin que se altere el entorno del juego, es decir, solo cambian aquellas condiciones que dependen de las decisiones o acciones de los jugadores [20].

Juego Evolutivo: La Teoría de Juegos Evolutiva estudia la evolución de las poblaciones de jugadores, su interacción estratégica, evolución de posibles coaliciones y comportamientos complejos. Aunque inicialmente los Juegos Evolutivos derivaron del estudio de la Biología y las Ciencias Sociales, en el campo de las Telecomunicaciones, se extiende por ejemplo, al estudio de las poblaciones de nodos inalámbricos que componen una red [23].

Las clasificaciones anteriormente mencionadas no corresponden a conjuntos o modelos de juegos aislados o absolutos, los modelos de juegos se combinan para ajustarse desde la Teoría de Juegos a situaciones del mundo cotidiano de una manera más cercana hacia una concepción realista.

2.2. ESTRATEGIAS

Teniendo en cuenta el conjunto de jugadores expresado como $N = \{1, 2, \dots, N\}$, se tiene el conjunto de acciones disponibles para cada uno de los jugadores definida como $\{A_i\}_{i \in N}$. El vector de acciones $a = \{a_1, a_2, \dots, a_N\} \in A$ con $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N$, es llamado perfil de acción. Cabe hacer la distinción entre la palabra acción y estrategia, aunque los conceptos en algunos casos puedan coincidir; esto no se aplica para todas las situaciones. A menudo, la acción es el resultado de una estrategia y puede ser vista como la traducción de la decisión del jugador de acuerdo a la influencia del mundo físico donde los juegos toman lugar [23].

Las estrategias se pueden clasificar como:

Estrategias Puras: El jugador cuenta con un número finito de opciones para desempeñarse en el juego. La estrategia se dice que es pura, cuando el jugador hace la elección de una de las alternativas que él posee con una probabilidad de uno [23].

Estrategias Mixtas: Se define como una distribución de probabilidad sobre las acciones o estrategias puras de los jugadores.

El juego estratégico es una interacción en la que los participantes realizan la elección de sus estrategias para la obtención del mayor provecho en el juego, lo cual refleja su racionalidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, se encuentra que hay estrategias que tienen un mayor grado de preferencia; es decir, que presentan un grado de dominancia sobre otras estrategias. A partir de lo anterior se definen las estrategias Dominantes.

Estrategias Dominantes: Considerando un juego en forma estratégica o normal; definido como $G = (N, \{S_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N})$, la estrategia \hat{S}_i , es una estrategia dominante para el jugador i , si se cumple lo mostrado en la expresión 2.3 [23].

$$\forall s_{-i} \in S_{-i}, \forall s_i \in S_i, u_i(\hat{S}_i, s_{-i}) \geq u_i(s_i, s_{-i}), \quad (2.3)$$

donde:

- S_i es el conjunto de estrategias para el jugador i .
- S_{-i} representa el conjunto de estrategias para los demás jugadores excepto el jugador i .
- s_i es la estrategia para el jugador i .
- s_{-i} hace referencia a la estrategia para los demás jugadores exceptuando el jugador i .

La ecuación (2.3) indica que si el jugador i elige la estrategia \hat{S}_i , ésta brinda un mejor beneficio que si se optara por la estrategia s_i , teniendo en cuenta la elección de los demás jugadores s_{-i} .

El planteamiento mostrado en la ecuación (2.3), hace alusión a una estrategia conocida como débilmente dominante. Al realizar un cambio del símbolo “ \geq ” por “ $>$ ” en la desigualdad de dicha ecuación, se obtiene un tipo de estrategia dominante conocida como estrictamente dominante.

En el contexto de un juego, los jugadores se decidirán por emplear sus estrategias dominantes, porque con ello, las ganancias a partir de dicha elección serán más provechosas. En algunos tipos de Juego, el conocer las estrategias dominantes y las dominadas puede ser suficiente para predecir los resultados del juego: este tipo de juego se dice ser de Dominio Resoluble.

Teniendo en cuenta el carácter de dominancia previamente mencionado, surge un concepto denominado Mejor Respuesta (BR, *Best Response*), que se enuncia así:

La mejor respuesta (BR) de un jugador i , al perfil de estrategia s_{-i} , es la correspondencia dada por la expresión 2.4 [23]:

$$\mathbf{BR}_i(s_{-i}) = \arg \max u_i(s_i, s_{-i}); \forall s_i \in S_i. \quad (2.4)$$

Para una situación de interacción o Juego, el jugador i como jugador racional, en aras de obtener el mayor beneficio, debe optar por la estrategia s_i que se encuentra en el conjunto de su mejor respuesta $\mathbf{BR}_i(s_{-i})$, en respuesta a la elección de la estrategia de sus competidores, representada por s_{-i} .

El concepto Mejor respuesta (BR), permite la caracterización de la noción *Equilibrio de Nash*.

2.3. EQUILIBRIO

El propósito de la Teoría de Juegos (GT) no es examinar todos y cada uno de los cursos que de manera fortuita pueda tomar un jugador y todos los resultados que puedan suscitarse. La Teoría de Juegos en lugar de eso, busca determinar si es posible la solución o resultado más probable del juego.

Aquellos resultados probables se denominan equilibrios, los cuales corresponden a un conjunto de estrategias para los jugadores en el juego, caracterizadas porque aquellas estrategias se eligieron sin alguna clase de arrepentimiento por parte de los jugadores y que han sido tomadas por los mismos con base a la racionalidad para la obtención de un mayor provecho [17].

A partir de lo anterior, se define el equilibrio de Nash, designado de esta manera en honor a John Nash, por sus estudios y postulados.

Definición: Dado un juego $G = (N, \{S_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N})$, dada la estrategia $s_i \in S_i$. La estrategia s_i^* corresponde a un Equilibrio de Nash (NE, *Nash Equilibrium*) si:

$$\forall i \in N, \forall s_i \in S_i, u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*). \quad (2.5)$$

Además; la estrategia s^* representa un Equilibrio de Nash (NE), si cumple:

$$s^* \in \mathbf{BR}_i(s_{-i}). \quad (2.6)$$

Las expresiones (2.5) y (2.6) plantean que cuando un jugador se encuentra en equilibrio de Nash, no puede obtener mayor grado de utilidad o beneficio por el cambio unilateral y egoísta en su acción, dado que si cambia dicha acción se afectará la utilidad de todos los participantes del juego [20], [22].

2.4. MODELOS DE TEORÍA DE JUEGOS PARA ACCESO MÚLTIPLE ALEATORIO EN REDES INALÁMBRICAS.

Las redes inalámbricas actuales se conforman de un amplio conjunto de usuarios con diferentes requerimientos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality o Service*). Debido a que los recursos de la red son limitados, si los usuarios acceden a estos de manera egoísta y codiciosa para mejorar sus requerimientos de QoS, pueden ocasionar que el desempeño de la red no sea el adecuado. Es en este entorno de recursos compartidos limitados y con usuarios que presentan distintos objetivos donde la Teoría de Juegos se puede aplicar para analizar el comportamiento y la toma de decisiones [6].

Específicamente para el proceso de acceso múltiple aleatorio al canal compartido, se han desarrollado modelos desde la perspectiva de la Teoría de Juegos, para entender y analizar el comportamiento individual o grupal que los nodos presentan. Algunos de estos modelos se han aplicado para el análisis de redes inalámbricas Ad Hoc Convencionales, redes Ad Hoc Móviles (MANET, *Mobile Ad Hoc Networks*), redes de sensores y redes Mesh, entre otras [21], [24], [25], [26].

Recordando que el objeto de estudio del presente trabajo de grado son las redes VANET, para las cuales el estándar IEEE 802.11p es el responsable de la gestión de acceso al medio a través del protocolo CSMA/CA. A partir de esto, se delimita el campo de estudio hacia los modelos de Teoría de Juegos (GT) enfocados hacia el análisis del protocolo CSMA/CA.

➤ **Modelos de Teoría de Juegos para sistemas CSMA/CA.**

En esta sección se describen las características de los modelos orientados desde la Teoría de Juegos para el estudio y análisis del protocolo CSMA/CA. Se pueden modelar los sistemas CSMA/CA mediante modelos de Teoría de Juegos no cooperativos estáticos, no cooperativos dinámicos y modelos no cooperativos repetidos. Los modelos de juegos no cooperativos se orientan hacia el estudio de los comportamientos de los nodos en la red inalámbrica enfocados a acceder al medio compartido mediante el ajuste de valores pequeños de tiempo de *Back-off* en su proceso de contienda por el acceso al medio inalámbrico [6], [27]. Sin embargo, un comportamiento de este tipo en la red por parte de un nodo o una pequeña fracción de nodos, afecta el acceso al medio de otros usuarios honestos, debido al incremento en el número de colisiones, y por ende el desempeño de la red. Teniendo en cuenta esto, se han desarrollado modelos de juegos desde la perspectiva de los juegos Cooperativos, para obtener un comportamiento que asegure el bienestar en general de los nodos por medio de incentivos o penalidades en el Juego [27].

✓ **Modelo de Juego Estático No Cooperativo.**

Este modelo representa la interacción no cooperativa que se origina en el proceso de acceso al medio, como un juego en el cual los jugadores realizan sus jugadas de manera simultánea, desconociendo la elección de sus competidores. En este caso se considera el Juego desde la perspectiva de una sola etapa, es decir, que se ejecuta una sola vez en un intervalo de tiempo discreto o *slot* de tiempo.

El escenario de análisis consiste de dos jugadores o nodos inalámbricos, el jugador i y el jugador j , que tienen como acciones disponibles Transmitir (T) o Esperar (W). Además los posibles resultados del proceso de transmisión son transmisión exitosa, transmisión fallida (colisión) y no transmisión, a los cuales se asocia un pago, u^s , u^f y u^w respectivamente, que además cumplen con relación mostrada en la ecuación (2.7).

$$u^f < u^w < u^s. \tag{2.7}$$

La relación de las acciones y los pagos asociados a la elección de las mismas, se muestra en la figura 2.1.

		Nodo j	
		T	W
Nodo i	T	u_i^f, u_j^f	u_i^s, u_j^w
	W	u_i^w, u_j^s	u_i^w, u_j^w

Figura 2.1 Matriz del juego Estático No Cooperativo. Adaptado de [28].

Teniendo en cuenta que los jugadores son racionales, ya que buscan obtener un alto valor en sus utilidades, hay dos Equilibrios de Nash (NE) en las estrategias puras (T,W) y (W,T) [28].

En la práctica, las redes pueden componerse de un mayor número de nodos; por lo tanto, el juego se denomina *Juego de Acceso Múltiple*. Además cada jugador no tiene plena confianza en las elecciones que puedan llevar a cabo sus oponentes, por lo que a sus alternativas les asigna una distribución de probabilidad, es decir, hace uso de las estrategias mixtas [27], [28].

Considerando un entorno de análisis de una red con n nodos interactuando para acceder al canal en un instante de tiempo, los nodos deciden si transmiten con una probabilidad p_i , o si no lo hacen con una probabilidad de $1-p_i$. Asumiendo por simplicidad que el valor de p_i es el mismo para todos los jugadores, es decir $p=p_1=p_2=\dots=p_M$, se tiene un comportamiento simétrico, y existe una única solución (Equilibrio) la cual es una estrategia simétrica $s^*=s_1^*=s_2^*=\dots=s_M^*$ para este juego, la cual se muestra en la ecuación 2.8, la que corresponde a la mejor respuesta para los nodos [27], [28]:

$$s^* = 1 - \left(\frac{u^w - u^f}{u^s - u^f} \right)^{\frac{1}{n-1}}. \quad (2.8)$$

✓ Modelo de Juego Dinámico No Cooperativo de Información Incompleta.

En esta situación el juego de Acceso Múltiple considera varias etapas (juego dinámico), se caracteriza por ejecutarse un número finito de veces; y en cada etapa del juego interactúan y compiten simultáneamente por el acceso al canal un número n de nodos, donde n corresponde al estado del Juego. Además, la información del estado del juego (la cual se consigue a través de la detección del medio inalámbrico), con la que cuentan cada uno de los participantes del juego (nodos inalámbricos) es de carácter limitada, por lo cual se trata de juego estático repetido o juego dinámico de información incompleta.

En este escenario de juego, los participantes del mismo ejecutan la elección de sus estrategias con base en la estimación del estado del juego n en etapas previas a la etapa actual de interacción. De acuerdo a esto, los jugadores mantienen un historial o registro de información de sus procesos de juegos anteriores.

El valor de n depende de los parámetros τ y ρ , que corresponden respectivamente a la probabilidad de transmisión de trama y la probabilidad de colisión de trama, valores que se obtienen mediante la detección del medio en el proceso de contienda.

Las expresiones que definen los valores de los parámetros τ , ρ y n se muestran en las ecuaciones (2.9), (2.10) y (2.11) [28].

$$\tau = \frac{\text{Num.tramas.Tx} + \text{Num.ACK.NoRx}}{\text{Num.Slots}}. \quad (2.9)$$

$$\rho = \frac{\text{Num.ACK.NoRx}}{\text{Num.tramas.Tx} + \text{Num.ACK.NoRx}}. \quad (2.10)$$

$$n = f(\tau, \rho) = 1 + \frac{\log(1-p)}{\log(1-\tau)}, \quad (2.11)$$

donde:

- *Num. tramas.Tx*, es el número de tramas de datos transmitidas exitosamente.
- *Num.ACK.NoRx*, corresponde al número de tramas que no se recibieron satisfactoriamente.
- *Num.Slots*, Número de intervalos de tiempo discretos que han transcurrido.
- n corresponde al número de nodos competidores.
- ρ es la probabilidad de colisión de trama.
- τ es la probabilidad de transmisión.

Las ecuaciones (2.9), (2.10) y (2.11), son bastante precisas para condiciones saturadas, es decir, cuando cada nodo tiene siempre un paquete esperando por ser transmitido, por lo menos para un intervalo de tiempo. Para adaptar estas expresiones a condiciones no saturadas se plantea un mecanismo de Planificación de Tramas Virtuales (VFS, *Virtual Frame Scheduling*), para estimar de manera precisa el valor de la probabilidad de colisión de trama; a partir de este valor y aplicando la ecuación (2.12) se puede calcular la probabilidad de transmisión para cada nodo [6], [28].

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(CW_{min}+1)+pCW_{min}(1-(2p)^m)}. \quad (2.12)$$

En la ecuación anterior se observa que el valor de la probabilidad de transmisión τ está en función de parámetros de contienda como lo es CW_{min} que es la ventana de contienda mínima de un intervalo anterior, m que identifica la máxima etapa de *Back-off*², y de la probabilidad de colisión condicional de trama p . A partir de los valores obtenidos de la probabilidad de transmisión y la probabilidad de colisión (historial de información) y la ecuación (2.11) se encuentra el valor n . La estrategia de cada nodo corresponde a la ventana de contienda mínima CW_{min} , valor que se obtiene en función del valor del estado del juego que corresponde al número de nodos competidores n , mediante la ecuación (2.13) [28].

$$CW_{min} = \min([n * rand(7,8)], CW_{max}). \quad (2.13)$$

donde:

- n es el número de nodos competidores.
- CW_{max} es la ventana máxima de contienda.
- $rand(7,8)$ retorna un número aleatorio real en el intervalo 7 y 8.
- $[x]$ retorna la parte entera inferior a x .

² *Máxima Etapa de Back-off* se refiere al máximo número de intentos de transmisión no satisfactorios (colisiones) después de los cuales se llega al máximo valor de la ventana de contienda[29].

- $\min(x, y)$ compara los valores x e y , retornando el mínimo valor.

La solución o equilibrio del juego, se basa estrechamente con el estado actual del juego el cual está dado por el número de nodos competidores n [27], [28].

✓ **Modelo de Teoría de Juegos Incompletamente Cooperativo.**

El Juego Incompletamente Cooperativo se caracteriza por ser un juego estocástico, el cual comienza cuando un paquete llega al *buffer* de transmisión y termina cuando dicho paquete se transmite satisfactoriamente o se descarta. Además, el proceso de juego se compone de muchos intervalos de tiempo, y cada uno de estos representa un estado del juego. El juego plantea que los nodos pueden estimar el estado del juego mediante la detección del canal en el tiempo, hasta que este estado se pueda estimar con bastante precisión. Debido al estado variable del juego y a que este se repite de manera finita, puede llegar a ser imposible para un nodo detectar de manera precisa el estado del Juego, por lo tanto, cada nodo puede acceder a la información del estado del juego de manera parcial o incompleta. [26].

En el Juego Incompletamente Cooperativo, los jugadores realizan la elección de sus estrategias de manera simultánea, y por disponer de escasa información acerca del curso del sistema, estos tienen que determinar el estado actual del juego en base a las estimaciones realizadas en los intervalos de tiempo precedentes. Teniendo que el estado del juego varía continuamente, la estrategia de cada nodo también es siempre variable [24], [26].

El juego en [26] sigue un proceso similar al numeral 2.5.1.2 (Modelo del Juego Dinámico No cooperativo de información incompleta). En el modelo Incompletamente Cooperativo se plantea la existencia de un mecanismo virtual CSMA/CA denominado V-CSMA/CA, mediante el cual es posible la determinación del estado del juego que corresponde al número de competidores. El mecanismo V-CSMA/CA sigue la operación del esquema CSMA/CA, pero en su lugar transmite tramas virtuales en vez de tramas de datos reales (no se transmiten tramas de datos reales, por lo cual, no hay consumo adicional de ancho de banda o energía). Además estima el valor de la probabilidad de colisión condicional de trama, como si realmente se hubiese enviado una trama real.

Luego de la transmisión de la trama virtual, en el siguiente intervalo de tiempo el nodo detecta el canal. En este punto es donde V-CSMA/CA se torna diferente respecto al mecanismo estándar, ya que se manifiesta que la trama virtual ha colisionado si el canal se detecta ocupado por otro nodo, pero si el canal se encuentra libre el nodo asume que su trama virtual se ha transmitido satisfactoriamente. Por lo tanto, en este modelo el nodo opera un mecanismo CSMA/CA híbrido, por un lado, cuando se tienen paquetes de datos para enviar el nodo opera con el mecanismo CSMA/CA convencional, y cuando el nodo no tiene paquetes reales para enviar, opera en modo V-CSMA/CA mediante la transmisión de tramas virtuales. De esta forma, el nodo tiene siempre paquetes para enviar, por lo cual es válido aplicar las ecuaciones (2.9), (2.10) y (2.11), para la determinación del estado del juego, y por consiguiente de acuerdo a esto, escoger la mejor estrategia para competir por el medio con los demás nodos inalámbricos [24], [26], [27].

El proceso de interacción se ilustra mediante la matriz del juego mostrada en la figura 2.2 [26].

		Jugador 2 (Oponentes del Jugador 1) (Todos los demás n jugadores)		
		Back-off	Transmisión Satisfactoria	Transmisión Fallida
Jugador 1 (Nodo i)	Back-off	(c_i, \bar{c}_i)	(c_j, \bar{c}_s)	(c_i, \bar{c}_f)
	Transmisión	(c_s, \bar{c}_j)	(c_f, \bar{c}_f)	

Figura 2.2 Matriz del Juego incompletamente Cooperativo. Adaptado de [26].

El diagrama mostrado en la figura 2.2 plantea que un jugador no siempre es un único nodo. Se observa que el jugador 1 corresponde en este caso al nodo i y el jugador 2 son todos los demás jugadores (nodos) que compiten contra el jugador 1. Las acciones disponibles para el jugador 1 son “Transmisión” y “Back-off”. Las alternativas del jugador 2 son “Back-off”, “Transmisión Exitosa” y “Transmisión Fallida”. Los pagos recibidos por los jugadores son: para el jugador 1, c_i , c_f y c_s ; para el jugador 2, \bar{c}_i , \bar{c}_f y \bar{c}_s , los cuales corresponden respectivamente al beneficio obtenido debido a la elección de “Back-off” o a la selección de “Transmisión” da una colisión, o por escoger “Transmisión” y los datos son transmitidos de manera exitosa.

La selección de una estrategia adecuada por parte de los jugadores se basa en maximizar el pago mediante la variación de la probabilidad de transmisión p_i (Para el jugador i -ésimo), mediante el uso de estrategias mixtas. En este juego los jugadores procuran que no únicamente su beneficio sea provechoso, sino que cada nodo ayuda a sus competidores a mejorar sus pagos para garantizar un bienestar conjunto.

En [30], se describe un modelo de juego cooperativo de información incompleta en el que los nodos son estimulados a la cooperación mediante la consideración de estímulos o incentivos. Además, para asegurar que los nodos no se desvíen hacia un mal comportamiento (comportamiento egoísta) por el acceso al medio, se establece un mecanismo de castigo o penalización, lo que ocasiona una reducción en el valor del pago obtenido. Para ejecutar dicha tarea en un ambiente de red distribuido, se escoge un nodo que operará como un nodo controlador, responsable de las penalizaciones o incentivos.

✓ Modelo Incompletamente Cooperativo Repetido

En [31], se analiza mediante Teoría de Juegos, los ataques de *Back-off* en CSMA/CA, los cuales se producen por una configuración no estándar del software del controlador de la tarjeta de red del nodo inalámbrico, lo que causa que presente una ventaja en el proceso de acceso frente a los demás nodos. El sistema se analiza como un juego Incompletamente Cooperativo repetido en el cual se considera maximizar la utilidad a largo plazo de todo el sistema, de acuerdo a la selección de un valor de ventana de contienda para el tiempo de *Back-off* de un conjunto factible. La función de pago o *payoff* se define en función del ancho de banda del canal compartido con base a la maximización del *Throughput*³.

³ *Throughput* Se refiere a la velocidad total del flujo de información de una red de información.

Sin embargo, la solución del juego No Cooperativo no es eficiente ni justa respecto a la gestión de acceso al medio. Por lo tanto para obtener una mejor solución del mismo juego, se extiende a un juego repetido finitamente, en el cual, se tiene en cuenta que las acciones actuales afectan la situación del juego en etapas posteriores. Para evitar un mal comportamiento (comportamiento egoísta o malicioso) que propicie la generación de ataques de *Back-off*, se implementa la estrategia de cooperación a través de Inclinación aleatorizada al Juego Egoísta/Codicioso. (CRISP, *Cooperation via Randomized Inclination to Selfish/Greedy Play*), la cual es una distribución de probabilidad sobre las distintas configuraciones de los parámetros de *Back-off*. Un nodo que se desvíe de la estrategia CRISP experimentará un pago menor respecto a otro que si la haya seleccionado.

✓ **Modelo de Juego de Acceso Aleatorio**

El Modelo de Juego de Acceso Aleatorio (RAG, *Random Access Game*) se gesta basado en el análisis del proceso de contienda y control al acceso al medio del protocolo CSMA/CA. En el Juego RAG, se considera que la estrategia de los jugadores o nodos inalámbricos es la probabilidad de acceso al canal la cual se ajusta mediante un algoritmo de resolución de contienda (*Back-off* o persistencia) en respuesta a la contienda que se presente en la red, estimado por cada uno de los nodos mediante una realimentación iterativa de la medida de la probabilidad condicional de colisión. La forma en que se estima la probabilidad de colisión se realiza mediante la observación de los intervalos libres promedio entre transmisiones exitosas, con lo cual se desacopla el análisis del manejo de transmisiones fallidas. La función de pago o de *payoff* de cada nodo se define teniendo en cuenta, tanto la utilidad adquirida por el acceso al canal así como el costo debido a las colisiones. Además el juego se analiza desde la perspectiva de que los nodos a pesar de ser entidades que se comportan de manera egoísta, están en la disponibilidad de realizar cooperación dentro de la posibilidad que ofrece la poca información acerca del estado de la red que cada uno de los nodos de esta maneja [32].

La solución o equilibrio del juego se logra mediante la actualización de las estrategias de los jugadores en respuesta a las observaciones que cada uno de estos realiza de la escasa información del estado del juego. Por un lado la ecuación (2.4), plantea la dinámica más simple la cual corresponde a la Mejor Respuesta (BR), esta establece que en la actualización de las estrategias de los jugadores se opta por la mejor respuesta dadas las acciones de los competidores en etapas previas de juego.

Por otra parte, se plantea un mecanismo llamado Juego Gradiente (*Gradient Play*), mediante el cual, cada jugador del juego de acceso aleatorio actualiza su estrategia (la probabilidad de acceso al canal) en la dirección de un gradiente sugerido dada la observación de las acciones de los demás jugadores [32], [33].

En [34] se considera una red la cual se encuentra en saturación, es decir que los nodos inalámbricos tienen siempre paquetes para enviar. En este sistema se aplica el juego de acceso aleatorio para modelar el proceso de acceso al canal en una red WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), en la que el procedimiento de contienda por el medio se realiza basado en un proceso de *Back-off* exponencial, similar al que se ejecuta en el mecanismo CSMA/CA.

A partir de los puntos de operación estable y de desempeño óptimos, se hace la inferencia de las funciones de utilidad y pago para este sistema centrado sobre procesos de ingeniería

directa, inversa, y procesos de heurística, que aseguren la existencia de un equilibrio o solución para el juego. El juego resultante al aplicar el modelo de Juego de Acceso Aleatorio al contexto WiMAX se define como Modelo de Teoría de Juegos de Acceso al Medio (GTMA, *Game-Theoretic Medium Access*), el cual se analiza desde la perspectiva del modelo de Juego No Cooperativo para estudiar las dinámicas (Mejor Respuesta o Juego Gradiente) que pueden llevarlo al equilibrio. En este juego los jugadores o estaciones subscriptoras (SS, *Subscriber Station*), tienen como estrategia la probabilidad de acceso o probabilidad de persistencia, y como medida de la contienda; la probabilidad condicional de colisión.

En la tabla 2.1 se resume los modelos de Teoría de Juegos que han sido enfocados hacia el estudio del protocolo CSMA/CA.

Terminada la descripción de los modelos enfocados al análisis del protocolo CSMA/CA, en el siguiente capítulo se hace la descripción del modelo elegido para el análisis del proceso de *Back-off* en el contexto de las redes VANET.

Tabla 2.1 Resumen de los Modelos de Teoría de Juegos en sistemas CSMA/CA

<i>Modelo</i>	<i>Descripción General</i>	<i>Estrategia</i>	<i>Método de Actualización de Estrategias</i>
Juego estático No Cooperativo	En este juego de una sola etapa, los jugadores realizan sus movidas de manera simultánea, sin conocimiento de lo que sus competidores han elegido.	Transmisión o No Transmisión (<i>Back-off</i>)	N/A
Juego Dinámico No Cooperativo de Información Incompleta	Corresponde a un juego no cooperativo de múltiples etapas; los jugadores eligen sus estrategias de acuerdo a un historial de información de etapas previas de juego.	Ventana de Contienda Mínima	Aprendizaje Dinámico a través de información de etapas previas del Juego
Juego Incompletamente Cooperativo	El proceso de juego se compone de muchos <i>intervalos</i> de tiempo, y cada uno de estos representa un estado del juego. Los jugadores estiman el estado total del juego (número de competidores), para elegir una estrategia con base en la escasa información recolectada de etapas previas de juego.	Ventana de Contienda Mínima	Aproximación distribuida para la actualización de información de los nodos [27].
	Juego Cooperativo basado en Incentivos que propician el comportamiento conjunto. Mediante mecanismos de castigo, se fomenta los comportamientos cooperativos, desanimando a desviarse hacia un mal comportamiento.	Transmisión o <i>Back-off</i>	Algoritmo de Coordinación basado en redondeo [30].
Juego Incompletamente Cooperativo Repetido	En este modelo los jugadores realizan la elección de sus estrategias enfocados hacia la obtención de un ancho de banda justo y de un valor de <i>Throughput</i> satisfactorio.	Ventana de Contienda	Mecanismo CRISP [31].
Juego de Acceso Aleatorio - Random Access Game RAG.	Modelo de Juego diseñado a partir del análisis del protocolo CSMA/CA. Los jugadores realizan la elección de sus estrategias basados en la estimación del nivel de contienda del medio (probabilidad condicional de colisión).	Probabilidad de Acceso.	Mejor Respuesta o Juego Gradiente (Gradient play)

3. ADAPTACIÓN DEL MODELO

En este capítulo se describe la adaptación hacia el contexto de las redes VANET del modelo escogido para la elección de tiempo de *Back-off* basado en Teoría de Juegos. Adicionalmente, se detalla la metodología de simulación, se definen los escenarios y los casos que permitirán evaluar el desempeño del modelo seleccionado respecto al estándar IEEE802.11p. Los escenarios corresponden con distintos niveles de densidad de tramas analizados con base en el sistema en conjunto y dos casos particulares correspondientes a dos vehículos que experimentan distintas condiciones de tráfico vehicular.

3.1. ADAPTACIÓN DEL MODELO

El Juego de Acceso Aleatorio o *Random Access Game* RAG es un modelo orientado a situaciones de contienda que permite analizar, desde la perspectiva de la Teoría de Juegos GT, la interacción entre nodos inalámbricos que acceden al medio según métodos basados en contienda.

Al caracterizar el equilibrio de Nash del Juego RAG, estudiar sus dinámicas y construir sus estrategias, los autores en [32], [35] y [36], aportan un conjunto de herramientas analíticas gracias a las cuales es posible diseñar algoritmos de contienda distribuidos que permiten alcanzar una distribución equitativa o diferenciada del medio de transmisión en redes inalámbricas.

Así mismo, las herramientas mencionadas en [32], [35], y [36], hacen posible el estudio, desde la perspectiva de la Teoría de Juegos GT, de métodos de contienda existentes, con lo cual se consigue una comprensión de su comportamiento en términos de equilibrio y dinámica.

Teniendo en cuenta los estudios realizados en [32], [35], y [36]; se eligió este modelo para el presente trabajo de grado debido a que se ajusta completamente a los objetivos del mismo. Los autores de dicho modelo plantean una descripción detallada del diseño del modelo que está basado en los puntos óptimos de operación del protocolo CSMA/CA, lo cual hace una adaptación más fácil y conveniente para el escenario de las redes VANET.

Planteamiento del Random Access Game

Se considera un conjunto N de nodos en una red inalámbrica de área Local (WLAN, *Wireless Local Area Network*), con un método de acceso al medio basado en contienda. Asociado a cada nodo $i \in N$ se considera una probabilidad de acceso al canal $p_i(t)$ y una función de medida de contienda $q_i(t) \geq 0$. Cada nodo conoce su propia probabilidad de acceso p_i y su medida de contienda q_i pero no las de los demás nodos.

Así, cada nodo ajusta su probabilidad de acceso al canal en el instante $t + 1$ mediante alguna función \mathcal{F}_i como se muestra en la ecuación (3.1).

$$p_i(t + 1) = \mathcal{F}_i(p_i(t), q_i(t)). \quad (3.1)$$

La medida de contienda $q_i(t)$ es calculada por cada nodo a partir de la probabilidad de acceso de todos los nodos: $\mathbf{p}(t) = (p_i(t), i \in N)$, mediante alguna función \mathcal{G} , lo cual se muestra en la ecuación (3.2).

$$q_i(t) = G(\mathbf{p}(t)). \quad (3.2)$$

La función \mathcal{F} representa el algoritmo de resolución a través del cual un nodo ajusta la probabilidad con la que accede al canal, y la función G representa el mecanismo mediante el cual cada nodo estima su medida de contienda.

Si se asume que las ecuaciones (3.1) y (3.2) tienen un punto de equilibrio en \mathbf{p} y \mathbf{q} , la ecuación (3.1) en p_i y q_i de equilibrio se transforma en la ecuación (3.3).

$$p_i = \mathcal{F}_i(p_i, q_i). \quad (3.3)$$

Si se asume que \mathcal{F}_i es continuamente diferenciable y $\frac{\partial \mathcal{F}_i}{\partial q_i} \neq 0$ en $[0, 1]$, entonces por el teorema de la función implícita [37], existe una única función que es continuamente diferenciable F_i , como muestra la ecuación (3.4).

$$q_i = F_i(p_i). \quad (3.4)$$

Se define entonces la función de utilidad de cada nodo como lo muestra la ecuación (3.5).

$$U_i(p_i) = \int F_i(p_i) dp_i. \quad (3.5)$$

Dicho esto, se define a continuación, formalmente, el Juego de Acceso Aleatorio:

Definición 1: Un juego de Acceso Aleatorio RAG se define como una tripleta $G = \{N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N}\}$, donde N es un conjunto de jugadores, S_i es el campo de estrategias definido como $S_i := \{p_i | p_i \in [v_i, w_i]\}$ con $0 \leq v_i < w_i < 1$, y u_i es una función de pago o *payoff* definida así: $u_i(\mathbf{p}) := U_i(p_i) - p_i q_i(\mathbf{p})$ [29].

Se define p_i estrictamente menor que 1 para evitar que un nodo inalámbrico, representado por un jugador, ocupe todo el medio de transmisión. Así expresada, la función de pago se puede interpretar como una ganancia neta alcanzada de la diferencia entre la utilidad U_i obtenida por el uso de cierta estrategia y el costo q_i asociado a ella [32].

Por lo tanto, un protocolo de control de acceso al medio puede ser diseñado especificando las funciones U_i y q_i , las cuales definen el juego RAG, el cual, a su vez, define propiedades de funcionamiento del protocolo de acceso al medio en una red inalámbrica. Las ecuaciones (3.1) y (3.2) son entonces de central importancia puesto que a través de \mathcal{F} y \mathcal{G} se define el modo en que los nodos compiten por el acceso al medio, esto es, la estrategia de los jugadores.

En [38] y [39], los autores formulan una aproximación de desacoplamiento que permite relacionar la ventana de contienda con la probabilidad de acceso al medio a través de la ecuación (3.6)

$$p = \frac{2}{CW + 1}. \quad (3.6)$$

El Juego RAG se define de forma general; cada nodo i puede escoger la función de utilidad $U_i(.)$ que considere apropiada. Si todos los nodos tienen la misma función de utilidad, se habla de un sistema con usuarios homogéneos; en caso contrario se trata de un sistema con usuarios heterogéneos.

El Juego de Acceso Aleatorio RAG aplicado a las redes VANET.

Teniendo en cuenta que en el ámbito de las redes VANET, cada Categoría de Acceso (AC) se comporta como un nodo independiente, se define que cada AC se representa como un jugador que compite por el acceso al medio con todas las demás AC de la red. Esto es: cada AC, implementa una estrategia diferente. Los jugadores que tienen una trama disponible para transmisión, participan del juego. Su objetivo consiste en transmitir lo más pronto posible dicha trama. El tamaño de su ventana de contienda o , de forma equivalente, su probabilidad de acceso al canal, constituyen su estrategia.

Definidos así los jugadores, estos forman grupos de cuatro, que enfrentan un proceso de contienda interna; después sólo un jugador de cada grupo compite por una oportunidad de transmitir. Así, el modo en que estos jugadores compiten por el medio afecta de manera diferenciada a los jugadores que hacen parte de su grupo. Cada grupo está compuesto por jugadores de distintos niveles de prioridad, como se describió en el capítulo 1.

Desde el punto de vista de cada jugador, se hablará de jugadores *externos* en referencia a aquellos jugadores que no hacen parte de su grupo y jugadores *aliados* en referencia a aquellos jugadores que hacen parte de su grupo. Así mismo, se hablará de *aliados mayores* o *aliados menores* en referencia a aquellos jugadores que hacen parte del grupo y además son de mayor o menor prioridad respectivamente.

De acuerdo con lo expuesto en el primer capítulo, cuando una AC, debido a colisiones, intenta sucesivamente transmitir una trama, las demás AC acumulan nuevas tramas a la espera de una oportunidad. Además se impide que se realice un nuevo proceso de contienda interna durante un largo intervalo de tiempo, sosteniendo así el derecho a competir en detrimento de las AC de mayor prioridad.

En términos del juego, esto significa que el modo en que un jugador compite por el acceso al medio afecta negativamente a sus aliados; en la medida en que sus intentos de acceder al medio se prolongan en el tiempo, este perjuicio crece de forma proporcional a la cantidad de tramas acumuladas por dichos aliados. Dicho efecto es particularmente notable en el caso en que un jugador impide a sus aliados mayores participar de la contienda por el medio de transmisión. Debido a lo anterior, se plantea que un jugador compite por el medio bajo una presión proveniente de la necesidad de transmitir de sus aliados mayores.

Se define una medida del nivel de presión de los aliados mayores sobre un jugador que transmite, mediante la ecuación (3.7).

$$A_i = \sum_{k \in M} a_k Z_k, \quad (3.7)$$

donde M es el conjunto de aliados mayores del jugador i , Z es el tamaño en tramas de una cola de transmisión y a es un factor de presión asociado al nivel de prioridad de cada aliado mayor.

Teniendo en cuenta la presión ejercida por los aliados mayores, se planteó una función de utilidad que toma en cuenta la cantidad de tramas acumuladas por los jugadores aliados, como lo muestra la ecuación (3.8).

$$U_i(p_i) = (r_i + A_i)p_i, \quad (3.8)$$

donde r_i es un factor de utilidad de transmisión que refleja el nivel de prioridad del jugador. Dicho factor expresa matemáticamente la utilidad asociada a la transmisión de una trama de acuerdo con su nivel de prioridad.

En la ecuación (3.7) se observa que la presión máxima se obtiene cuando un jugador ha alcanzado el tamaño máximo en su cola de transmisión. Se define a_k de forma que, un jugador que recibe presión máxima proveniente del aliado inmediatamente superior, se ve obligado a jugar con una función de utilidad (sin considerar presión) igual a la de dicho aliado superior. Esto de acuerdo con la ecuación (3.9).

$$r_i = r'_i + a_i \max Z, \quad (3.9)$$

donde r'_i es el factor de utilidad de transmisión del aliado inmediatamente inferior del jugador i y $\max Z$ es el tamaño máximo de cola de transmisión del jugador i . Los autores en [32], [35], y [36] plantean una función llamada *Probabilidad Condicional de Colisión*. En la cual dicha medida de contienda depende exclusivamente de las condiciones de congestión del canal de transmisión.

$$\text{Probabilidad de colisión} = 1 - \prod_{j \in I_i} (1 - p_j), \quad i \in N, \quad (3.10)$$

donde I_i es el conjunto de nodos que interfieren con el nodo i .

De acuerdo con los autores en [32], [35], y [36], tal función provee una estimación bastante precisa del estado de contienda, superior a la señal binaria que emplea el estándar IEEE 802.11p. Adicionalmente, tal probabilidad condicional de colisión tiene la ventaja de no depender de la detección de colisiones para estimar las condiciones de contienda.

Los jugadores pueden estimar la probabilidad condicional de colisión a partir de la observación del promedio de *slots* o intervalos de tiempo desocupados en el canal, notado n' , como lo muestra la ecuación (3.11).

$$\text{Probabilidad de colisión} = \beta n' + (1 - \beta) \frac{1}{n+1}. \quad (3.11)$$

Así mismo en [32], [35] y [36] se realiza el cálculo del número promedio de intervalos de tiempo desocupados a través de un “promedio ponderado exponencialmente sobre la marcha” expresado a través de la ecuación (3.11). El factor de ponderación β determina el peso que se asigna al comportamiento previo de la variable n' . Con ello se aporta estabilidad a la estimación del estado de contienda del canal evitando que oscile de manera brusca.

Con el objeto de aumentar la precisión de esta medida de contienda, para el desarrollo del presente trabajo de grado se usa una combinación de ambos modos de estimar las condiciones del canal. La ecuación (3.12) mediante la cual un jugador estima las condiciones de contienda implica la consideración de un punto medio para la estimación ubicado entre la lectura del canal en términos de intervalos de tiempo desocupados y la lectura realizada a partir de colisiones registradas por el grupo. Ambos son datos compartidos por los jugadores de un grupo.

$$q_i = p_i c_i \left(\frac{1}{n+1} + \frac{Cx_i}{Tx_i} \right), \quad (3.12)$$

donde c_i es un factor de colisión que permite expresar matemáticamente el costo de las colisiones y Cx_i es el número de colisiones detectadas por el grupo de jugadores en el canal durante un intervalo de tiempo fijado durante el diseño. Este último se normaliza dividiéndolo por el número de intentos de transmisión Txi realizados por el grupo durante el mismo intervalo de tiempo.

Las variables r_i y c_i en (3.8) y (3.12) representan la importancia de una transmisión exitosa y de una colisión, respectivamente. La primera tiene que ver con el nivel de prioridad del jugador. La relación numérica entre una y otra tiene que ver con el tiempo que el canal permanece ocupado durante una transmisión exitosa o una colisión, como lo muestra la ecuación (3.13).

$$\frac{r}{c} = \frac{T_t}{T_c}, \quad (3.13)$$

donde; T_t y T_c son el tiempo de canal ocupado debido a una transmisión exitosa y a una colisión respectivamente.

Es necesario mencionar que una trama es descartada tras alcanzar el número máximo de intentos fallidos de transmisión. Por tanto, un jugador debe jugar con precaución para evitar que la trama sea descartada. Tal situación es expresada matemáticamente mediante un factor Rx , el cual magnifica el costo de una colisión a medida que el número de intentos fallidos se acerca al valor máximo, lo cual se aprecia en la ecuación (3.14).

$$Rx = 1 + Y \frac{\text{Retransmisiones}}{\text{MaxRetransmisiones}}. \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) implica que el costo de una colisión alcanza un valor $Rx = 1 + Y$ cuando la trama se encuentra en su último intento de transmisión. A partir de (3.13), se obtiene una expresión para c_i denotada por la ecuación (3.15).

$$c_i = Rx \left(r_i * \frac{T_c}{T_t} \right). \quad (3.15)$$

Si los jugadores emplean la estrategia denominada *Juego Gradiente* descrita en el numeral 2.5.1.5 actualizan su probabilidad de acceso mediante lo planteado en la ecuación (3.16).

$$p_i(t + 1) = [p_i(t) + f_i(p_i(t))(U'_i(p_i(t)) - q_i(\mathbf{p}(t)))]^{S_i}, \quad (3.16)$$

donde:

- $f_i(\cdot)$ es un factor que representa la rapidez con la que el jugador cambia su estrategia.
- $[\cdot]^{S_i}$ representa la proyección sobre el espacio de estrategias.
- $U'_i(p_i(t))$ corresponde a la utilidad marginal.
- $q_i(\mathbf{p}(t))$ es el costo debido a la contienda.

La ecuación (3.16) representa un mecanismo de actualización de los parámetros de contienda basado en el Juego RAG. El diagrama de flujo mostrado en la figura 3.1 define el proceso implementado a través de código que sigue el algoritmo RAG para el establecimiento de los valores de ventana de contienda.

Al fijar los parámetros del algoritmo, es posible manipular detalladamente su desempeño modificando la utilidad y costo asociados a una transmisión exitosa, colisión, descarte de trama y trama de aliado superior en cola. La variación de estos parámetros permite acomodar el algoritmo a distintos tipos de servicio.

Una vez que los parámetros están fijados, el algoritmo entra en funcionamiento: La capa física informa a la capa MAC a través de un mensaje de control cada vez que el canal cambia de estado ocupado a desocupado y viceversa. La capa MAC calcula a partir de dichos mensajes de control el número de slots desocupados consecutivos registrados y guarda un registro del número de slots de tiempo durante los cuales se ha realizado esta medición. Cuando el número de slots es superior a un máximo definido en los parámetros, la AC calcula el número promedio de slots desocupados consecutivos y calcula la probabilidad condicional de colisión. Sumada a la probabilidad condicional de colisión, se calcula una segunda probabilidad de colisión a partir del número de colisiones experimentadas previamente por el nodo. El promedio entre estas dos probabilidades es la estimación del estado de congestión del canal.

A continuación cada AC realiza una lectura del estado de contienda del nodo del que hace parte: número de tramas acumuladas en las colas de los aliados superiores, número de retransmisiones de la trama actual, costo de una colisión y utilidad de una transmisión exitosa. Finalmente la AC calcula un gradiente: amplitud del desplazamiento de la estrategia que debe realizar. Esto es de cuánto es el cambio de valor de ventana de contienda necesario. La nueva ventana de contienda es fijada a partir del gradiente. La velocidad con la que la AC cambia su CW se gradúa mediante los parámetros de funcionamiento

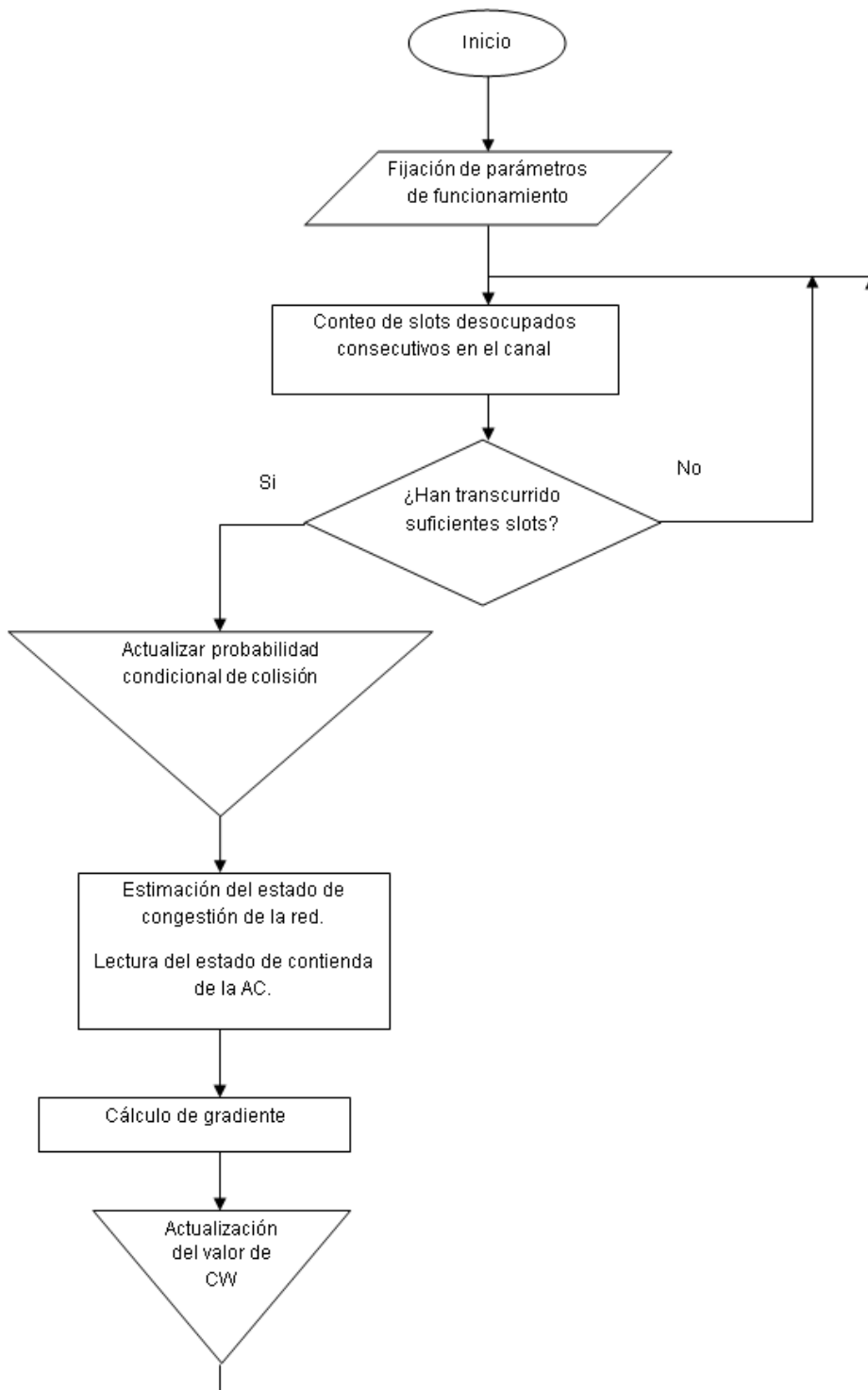


Figura 3.1 Diagrama de Flujo del algoritmo RAG. Por los Autores.

3.2. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA REDES VANET.

Para el estudio de las VANET en cualquier ambiente de experimentación, se hace necesaria la utilización de herramientas software debido a que es costoso acceder a dispositivos de estas tecnologías para propósitos de investigación.

De acuerdo al enfoque del presente trabajo de grado, se requiere que las herramientas de simulación soporten el estándar IEEE 802.11p para el estudio de las comunicaciones típicas en este tipo de redes, así mismo; que permitan la gestión de la movilidad vehicular y ciertos tópicos que acerquen el estudio de los escenarios vehiculares hacia un ambiente en cierto grado realista.

Los simuladores para redes VANET disponibles se encuentran clasificados en los siguientes grupos:

3.2.1. Simuladores Aislados

Donde se establece por separado la herramienta para simular la movilidad de los vehículos (Simulador de Tráfico vehicular) y por otro lado, para simular los enlaces de comunicaciones entre los vehículos en la red VANET (Simuladores de red) [40].

- **Simuladores de Tráfico**

Estos simuladores permiten modelar escenarios de tráfico vehicular y aspectos particulares como el número de carriles de una vía, patrones de conducción, accidentes, etc. Además este tipo de elementos software se enfoca hacia el análisis de la movilidad vehicular con un alto nivel de detalle [41], [42].

La tabla 3.1 resume los simuladores de tráfico estudiados.

Tabla 3.1 Simuladores de Tráfico. Por los Autores.

Simulador	Descripción	Plataforma
SUMO	SUMO (<i>Simulation of Urban Mobility</i>) es una herramienta altamente portable, <i>OpenSource</i> y <i>Freeware</i> para la simulación del tráfico vehicular. Además Incluye una interfaz gráfica (GUI, <i>Graphical User Interface</i>), presencia de distintos tipos de vehículos, posibilidad de importación de mapas y la gestión de modelos de tráfico a nivel Microscópico [42][43].	Disponible para Windows;Linux MacOs
CityMob	Es un generador de patrones de movilidad para redes VANET diseñado para ser utilizado en conjunto con el simulador de redes NS-2 [44].	Multiplataforma.
VanetMobiSim	Es una extensión de la herramienta CanuMobiSim, un marco flexible para el modelado de la movilidad del usuario. Puede generar trazas de movimiento en diferentes formatos, el apoyo a diferentes simulación / emulación de herramientas para redes móviles [40][45].	Windows, Linux.
MOVE	Es un simulador implementado en Java y está construido para ejecutarse en el tope del simulador SUMO. Permite la generación de escenarios realistas, así como de la edición de los mismos por medio de una interfaz gráfica de usuario GUI [46].	Multiplataforma

- **Simuladores de Red**

Los simuladores de red permiten modelar redes de telecomunicaciones con características de enrutamiento, calidad de servicio, medir la eficiencia de la red, entre otras. Los simuladores de red toman los patrones de movilidad de los simuladores de tráfico para implementar la comunicación entre nodos inalámbricos (como es el caso de las redes VANET), simulando los estándares y protocolos presentes en distintos tipos de redes [41]. A continuación en la tabla 3.2 se resume los simuladores de red estudiados.

Tabla 3.2 Simuladores de Red. Por los Autores.

Simulador	Descripción	Plataforma
OMNET++	Es un simulador de red extensible modular basada en componentes de librerías C++. Permite la simulación de distintos tipos de redes como redes cableadas e inalámbricas. Ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE, <i>Integrated Development Environment</i>) basado en Eclipse y cuenta con una interfaz de usuario GUI [47].	Multiplataforma
NS-2	Es un simulador dirigido a eventos discretos para la investigación de redes de Telecomunicaciones. Provee un soporte sustancial para la simulación de TCP, routing y protocolos Multicast sobre redes cableadas e inalámbricas [48].	Windows, Linux.
NS-3	Es un simulador de red dirigido a eventos discretos enfocado a la investigación y al uso educativo. Es una herramienta software libre con mejoras en cuanto a rendimiento respecto a su versión predecesora NS -2. Tiene como objetivo desarrollar un ambiente de simulación abierto para la investigación en redes [42] [49].	Windows, Linux.
GTNetS	El simulador de red de Georgia Tech (GTNetS) es un entorno de simulación de red con todas las funciones que permite a los investigadores en redes computacionales estudiar el comportamiento de redes de moderada y amplia escala [50].	Multiplataforma

3.2.2. Simuladores Integrados

También llamados simuladores VANET, incorporan un simulador de red y un generador de movilidad vehicular, el cual tiene como ventaja eliminar el procedimiento de integración de los simuladores, pero a costa de un desarrollo limitado de las herramientas y librerías [41]. A continuación en la tabla 3.3 se resume los simuladores integrados o VANET estudiados.

Tabla 3.3 Simuladores Integrados. Por los Autores.

Simulador	Descripción	Plataforma
GroveNet	Es un simulador VANET desarrollado en conjunto con General Motors; desarrollado en lenguaje Java permite la comunicación entre vehículos simulados y vehículos reales. Cuenta con un generador de movilidad propio denominado	Multiplataforma

	<i>GrooveSim</i> y está enfocado principalmente en las vías estadounidenses al permitir la importación de mapas tipo TIGER [42] [51].	
ESTINET (Antes NCTUns)	Es un simulador VANET de alta fidelidad y extensible, capaz de simular diversos protocolos utilizados en redes cableadas e inalámbricas. Fue desarrollado en la Universidad Chiao Tung de Taiwan y no se centra específicamente en la movilidad de los vehículos, sino que proporciona una completa gama de herramientas de simulación de red [42].	Linux

3.2.3. Simuladores Híbridos

Este tipo de simuladores tiene como tarea crear un enlace entre los simuladores de red y los simuladores de tráfico mediante una interfaz destinada para tal fin. Ambos simuladores trabajan en paralelo y pueden interactuar dinámicamente entre sí mediante la alteración de los patrones de movimiento basados en los flujos de red y viceversa. Este enfoque híbrido toma en consideración las mejores características de simuladores de tráfico vehicular y de red, por lo que son bastante utilizados al momento de simular redes VANET [40], [42].

La tabla 3.4 sintetiza los conceptos básicos de los simuladores Híbridos analizados.

Tabla 3.4 Simuladores Híbridos. Por los Autores.

Simulador	Descripción	Plataforma
TraNS	El entorno de simulación de tráfico y de red (<i>TraNS, Traffic and Network Simulation Environment</i>) es una herramienta que interconecta un simulador de red, que permite generar ambientes de simulación realistas para redes VANET. Está enfocado para la conexión de los simuladores NS-2 y SUMO [52].	Multiplataforma
MobiReal	Es un simulador híbrido que genera sus propias trazas de movilidad para ser exportadas al simulador GTNetS, con lo cual permite la simulación de redes móviles ad-hoc, VANET y el movimiento de peatones [40][42][53].	Multiplataforma
VEINS	Este simulador permite la conexión a través de un socket TCP del simulador de tráfico SUMO y el simulador de red OMNET++, lo que permite la comunicación bidireccional entre los simuladores, es decir, el movimiento de los vehículos en SUMO se refleja en el movimiento de los nodos en OMNET++ [54].	Multiplataforma

Teniendo en cuenta la descripción anterior de los distintos tipos de simuladores y los estudios realizados en [41], [42], [55] y [56] se escoge como simulador de tráfico a SUMO y a MOVE para la edición de los *scripts* de movilidad. Estas herramientas presentan un desarrollo continuo, cuentan con interfaz gráfica de usuario, son de código abierto *opensource*, se pueden descargar gratuitamente desde Internet y aún mantienen vigencia en el contexto científico.

Como simulador de red se eligió OMNET++, ya que cuenta con una cantidad necesaria de librerías para la implementación de una red VANET, además, cuenta con entorno gráfico de desarrollo. Este simulador se puede acoplar de forma bidireccional mediante el simulador híbrido VeINS gracias a una interfaz que se llama TraCI, permitiendo la simulación en tiempo real de este tipo de redes.

3.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

A continuación se listan los pasos que componen la metodología de simulación utilizada, basada en Ülgen y Wojcik en [57], [58], empleada durante el presente trabajo.

- Definición de los escenarios y casos de simulación.
- Definición de las características de los escenarios y casos de simulación.
- Ejecución de las pruebas de simulación
- Análisis de resultados.

3.3.1. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación.

Dado que el interés del presente trabajo se encuentra situado en el desempeño de un mecanismo de contienda bajo diversas condiciones de congestión de tramas de información, se plantean los escenarios y casos de simulación de la siguiente manera:

Se plantea dos escenarios de simulación y asociado con cada uno de ellos, se plantean dos casos correspondientes a los algoritmos evaluados, presentes en el nivel más bajo del árbol mostrado en la figura 3.2.

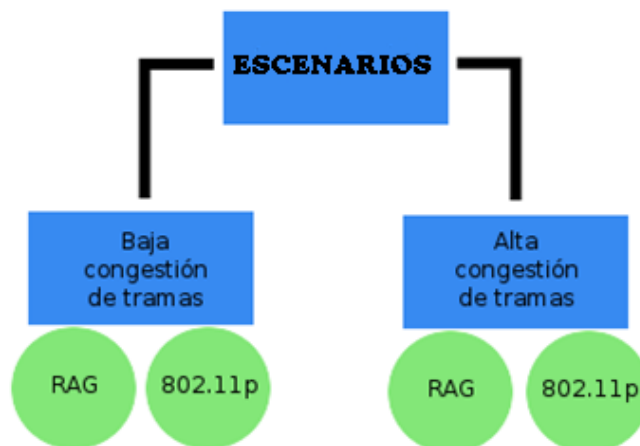


Figura 3.2 Escenarios y Casos de Simulación. Por los Autores

3.3.2. Definición de las Características de los Escenarios y Casos de Simulación

3.3.2.1. Escenarios

✓ Movilidad

El escenario de simulación se ha situado en un cruce de calles con varios semáforos presentes. El mapa refleja la estructura vial aledaña al hospital San José de la ciudad de Popayán. En términos generales se ha escogido dicho lugar por la naturaleza crítica del flujo vehicular en cercanías de un hospital.

A continuación, las figuras 3.3 y 3.4 muestran el mapa original de la zona y el modelo de movilidad generado mediante la herramienta SUMO respectivamente.

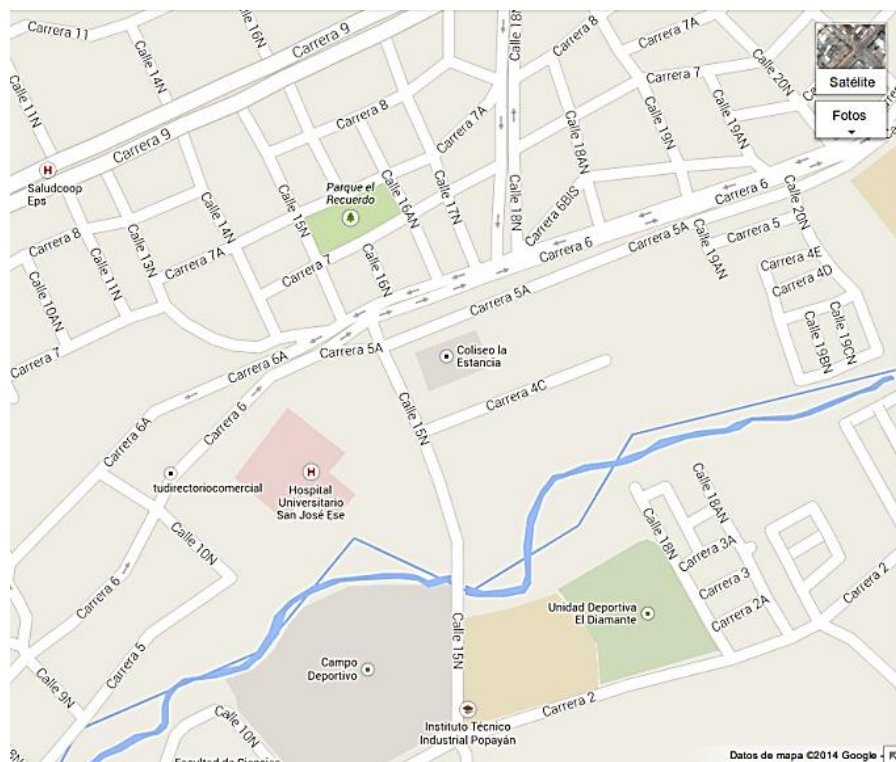


Figura 3.3 Mapa Original de la zona. Tomada de *OpenStreetMap*.

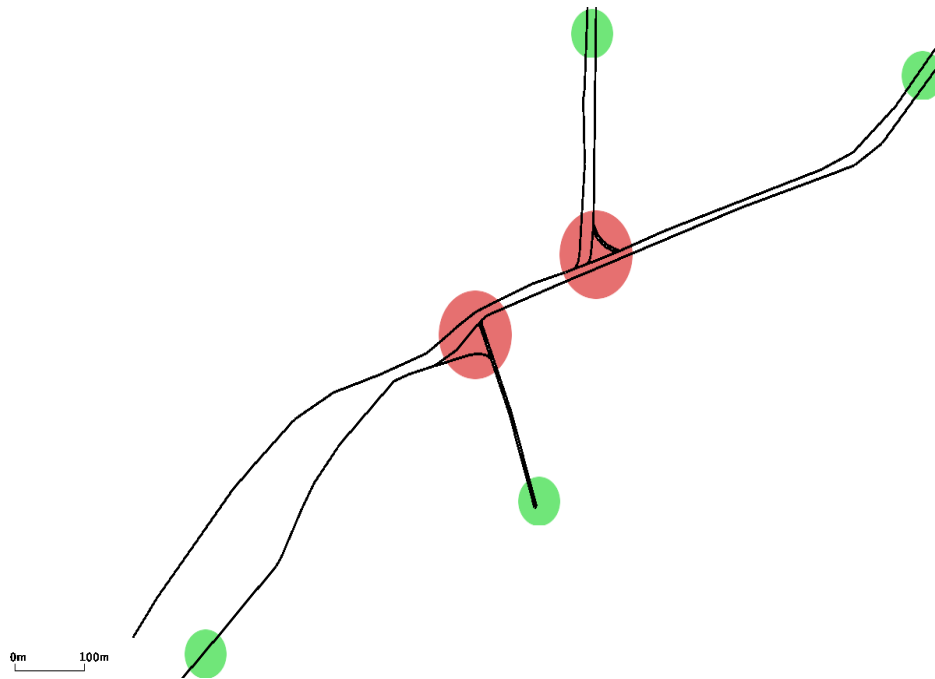


Figura 3.4 Mapa generado por la herramienta SUMO.

Las rutas reflejadas en el modelo corresponden a las calles más transitadas de la zona. Los vehículos son generados a intervalos regulares en los puntos marcados en verde. En los cruces marcados con rojo hay semáforos; son puntos donde se generan altos niveles de congestión. El funcionamiento de dichos semáforos refleja el funcionamiento real de los mismos en la zona designada.

✓ Red

A nivel de red el escenario de simulación ha sido definido bajo los siguientes criterios:

- ❖ La congestión de tramas hace referencia a la frecuencia con la que la capa de aplicación requiere la transmisión de un mensaje. Para cada escenario se estipuló una densidad de generación de mensajes conformando dos escenarios; el escenario 1 corresponde al escenario de *Baja Congestión de Tramas* y el escenario 2 a un escenario de *Alta Congestión de Tramas*.

En la tabla 3.6 se muestran los valores escogidos para la frecuencia de generación de los mensajes, que definen cada uno de los escenarios de simulación.

Tabla 3.5 Valores para cada escenario de simulación

Escenarios	Frecuencia de mensajes
Baja Congestión de Tramas	70/s
Alta Congestión de Tramas	150/s

- ❖ La cola AC que realice la transmisión de la trama correspondiente, depende de la prioridad asociada al mensaje. Se decidió una distribución aleatoria de la prioridad de los mensajes para los escenarios puesto que al tratarse de una tecnología en desarrollo no se dispone de datos estandarizados.
- ❖ Las estaciones operarán exclusivamente en el canal de control (CCH). En dicho canal se transmiten mensajes *Beacon* en modo *Broadcast* periódicamente. El estándar J2735 de la SAE [59] describe mensajes periódicos relacionados con seguridad transmitidos a una frecuencia ajustable de alrededor de 10 Hz. Para la simulación se fija la frecuencia de transmisión de *Beacons* en 10 Hz. Mediante dichos *Beacon*, a la par de información de seguridad, las estaciones establecen WBSS.
- ❖ Las estaciones transmitirán exclusivamente mensajes WSM.
- ❖ Cada estación generará mensajes WSM con una dirección de destino obtenida a partir de los *Beacons* recibidos. Dichos mensajes corresponden a cortos intercambios de información asociados a WBSS presentes en la red. Estos mensajes han sido denominados “mensajes con destino”.
- ❖ No se considerará la transmisión multi-salto de información puesto que el interés del presente trabajo tiene que ver con la contienda por el medio y no con el enrutamiento.
- ❖ Los mensajes con destino generan un ACK de confirmación por parte de la estación receptora. Una estación transmisora inicia un contador de espera de ACK, vencido este tiempo la estación transmisora considera que el mensaje ha colisionado.
- ❖ La potencia de transmisión ha sido fijada en 0.1919 mW. Dicho valor de potencia implica un alcance de 50 metros para los nodos transmisores. De esta forma, es posible realizar observaciones sobre zonas con distintos niveles de congestión vehicular.
- ❖ Los nodos realizan mediciones acerca del estado de congestión de la red con una frecuencia de 1 Hz.
- ❖ Los tiempos de una transmisión y una colisión son expresados según las ecuaciones (3.17) y (3.18) respectivamente

$$T_t = \frac{pHeader + PayloadMac}{br} + 2\delta + SIFS + \frac{ACK}{br} + AIFS, \quad (3.17)$$

$$T_c = \frac{pHeader + PayloadMac}{br} + 2\delta + SIFS + AIFS + CW * \sigma. \quad (3.18)$$

A continuación, la tabla 3.5 muestra los parámetros de transmisión y de contienda que son empleados por los nodos inalámbricos para acceder al medio de transmisión.

Tabla 3.6 Parámetros de Transmisión y Contienda

Parámetro	Valor
Payload MAC	512 bits
Duración Cabecera PHY	46 μ s
Bitrate (br)	18 Mbps
Retardo de propagación (δ)	0.166 μ s (para 50 metros de alcance)
Duración de un slot (σ)	13 μ s
SIFS	32 μ s
AIFS	SIFS + AIFSN * σ
Sensitividad	-89 dBm
Potencia de transmisión	0.1919 mW

Reemplazando en (3.17) y (3.18) se obtiene:

$$T_t = 182.45\mu\text{s} + \text{AIFSN} * \sigma, \quad (3.19)$$

$$T_c = 135.06\mu\text{s} + \text{AIFSN} * \sigma + \text{CW} * \sigma. \quad (3.20)$$

Como se ve, la variable T_t depende de la prioridad del jugador. T_c por su parte depende del valor en el que se encuentre fijada la ventana de contienda y, por lo tanto, debe ser calculada por cada jugador antes de actualizar su estrategia.

Todos los parámetros han sido tomados a partir de las especificaciones del estándar IEEE 802.11p con excepción del retardo de transmisión, el cual ha sido calculado a partir de la potencia de transmisión y el umbral de sensibilidad de las estaciones receptoras mediante la ecuación (3.21), que modela las pérdidas sufridas por una señal al ser radiada en el espacio libre (FSPL, *Free Space Path Loss*).

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2, \quad (3.21)$$

donde:

- d es la distancia dada en kilómetros.
- λ es la longitud de onda.

3.3.2.2. Casos

✓ Caso 1: 802.11p

Para el caso de simulación correspondiente al algoritmo BEB especificado por el estándar IEEE 802.11p se implementa el proceso descrito en la sección 1.1.6.

✓ Caso 2: RAG.

Buscando coherencia con el modo en que el estándar IEEE 802.11p fija los parámetros de contienda de las colas de transmisión, se establecen los valores de r_i como muestra la tabla

3.7, de forma que sin presión o colisiones, la utilidad asociada a la probabilidad de acceso al medio de cada jugador guarda relación con los valores de CW_{min} expuestos en la tabla 1.2.

Tabla 3.7 Valores del factor de transmisión por prioridad.

Prioridad	Factor de transmisión
1 (AC_V0)	$r_1=1/7$
2 (AC_V1)	$r_2=1/8$
3 (AC_BE)	$r_3=1/10$
4 (AC_BK)	$r_4=1/11$

La variable c_i es calculada por cada jugador a través de la ecuación (3.15). El valor de la variable Y se fija a dos (2), con lo cual el costo de colisión de una trama que es retransmitida por séptima vez es el triple de su valor original.

La variable a_k en la ecuación (3.7) expresa matemáticamente la importancia de una trama que se encuentra a la espera de ser transmitida. Sus valores son fijados de forma que cuando un jugador recibe máxima presión de parte de su aliado mayor inmediato, se ve obligado a acceder al medio con la función de utilidad de dicho aliado mayor. Un jugador ejerce máxima presión sobre su aliado menor cuando su cola de paquetes ha alcanzado el tamaño máximo de almacenamiento.

Considerando que en [60] se habla de colas de transmisión pequeñas de entre 1 y 30 paquetes y en [61] de colas de transmisión de 30 paquetes para la transmisión de video, y considerando que la información contenida por los *Beacons* es de naturaleza transitoria y el enfoque del presente trabajo es sobre mensajes relacionados con servicios establecidos entre vehículos, donde las tramas de información pueden llegar con cierto retraso, se decide fijar el tamaño de la cola en 30 tramas para las simulaciones subsecuentes.

De acuerdo con estas consideraciones se calcula el factor a_k a partir de la ecuación (3.9).

El valor de a_4 es indefinido puesto que no hay un aliado menor sobre el cual ejercer presión. Los distintos valores para cada uno de los factores de presión por cada clase de acceso AC se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Valores de Factores de Presión por Cada AC. Por los Autores.

Factor de presión	AC
$a_1=1/1680$	1(AC_V0)
$a_2=1/1200$	2(AC_V1)
$a_3=1/3300$	3(AC_BE)

$a_4 = n/a$	4(AC_BK)

Una vez calculados estos valores, al reemplazar en (3.16) queda planteado entonces el mecanismo de resolución de probabilidad de acceso al medio, como lo muestra la ecuación (3.22).

$$p_i(t + 1) = p_i(t) + 0.01 * \left[a_i + A_i - c_i \left(\frac{\frac{1}{n+1} - c_i \frac{c_{xi}}{Tx_i}}{2} \right) \right]. \quad (3.22)$$

El parámetro f_i se ha fijado en 0.01 con el objetivo de que los jugadores modifiquen su estrategia de manera progresiva, evitando así cambios abruptos generados por eventuales errores de medición o estimación del estado de la red.

En el siguiente capítulo se plantea la ejecución de las pruebas sobre los escenarios y el análisis sobre los algoritmos de resolución de contienda BEB y RAG que corresponden a los casos de análisis.

3.3.3. Ejecución de las pruebas de simulación

La ejecución de las pruebas se realizó utilizando las herramientas de simulación previamente elegidas; considerando un tiempo de simulación de 300 segundos, realizándose 3 iteraciones para cada escenario y caso de análisis.

Cada escenario de simulación constituido por doscientos ochenta Vehículos tipo *passenger* corresponde a una estructura vial simulada por la herramienta SUMO. Dicha estructura está basada en una zona real. Contiene puntos (semáforos) en los cuales se efectúa un control en la movilidad de los vehículos generándose acumulación de estos.

3.3.4. Análisis de Resultados.

Para analizar el desempeño de cada uno de los casos correspondientes a los algoritmos para el acceso al medio, se presenta una figura que contiene dos gráficas; la imagen superior corresponde al algoritmo BEB y la inferior al algoritmo RAG. De este modo se adelantará un análisis comparativo soportado en las figuras generadas.

Para cada escenario de simulación se considera inicialmente la inspección sobre la red VANET conformada por los todos los vehículos, considerando los siguientes aspectos de desempeño:

- ❖ **Total de Colisiones para cada Vehículo:** Este parámetro permite la estimación del número de colisiones totales que experimentan los distintos vehículos que hacen parte de la red durante el proceso de simulación.
- ❖ **Porcentaje de tramas descartadas:** Mediante esta medida se hace una estimación a nivel de sistema del porcentaje total de tramas que se descartan en el proceso de

contienda desde la perspectiva de cada uno de los distintos nodos que conforman la red simulada.

- ❖ **Número promedio de intentos de transmisión para cada trama:** Mediante este temática se hace un estudio del número de intentos que realiza cada vehículo hasta que sus tramas superan la contienda satisfactoriamente.
- ❖ **Tiempo promedio que tardan las tramas en superar el proceso de contienda exitosamente:** A través este parámetro se puede analizar el tiempo que se demoran las tramas hasta que se pueden transmitir satisfactoriamente sobre el medio compartido.

Por otro lado para el análisis de un vehículo y su estudio en particular, se definen los siguientes parámetros de medida de desempeño:

- ❖ **Ventana de contienda:** Parámetro fundamental para el análisis puesto que permite observar los parámetros de contienda adoptados por cada nodo durante el tiempo de simulación.
- ❖ **Colisiones por Intento de Transmisión de la AC:** Parámetro medido segundo a segundo que contrasta el número de intentos de transmisión con el número de colisiones detectadas en cada AC. El análisis de este parámetro permite observar la respuesta del algoritmo frente a cambios en las condiciones de congestión de la red. En lo sucesivo, se usará el acrónimo “CpTx” para hacer referencia a este parámetro.
- ❖ **Throughput medido en ACKs por segundo por cada AC:** Obtenido segundo a segundo y graficado en el tiempo. El *Throughput* permite observar cómo son afectadas las distintas categorías de acceso por las condiciones de la red.
- ❖ **Tramas descartadas por segundo por cada AC:** El número de tramas descartadas es un parámetro que se grafica acumulativamente en el tiempo con mediciones cada segundo para cada AC. Permite comparar la capacidad de reacción de cada algoritmo frente a colisiones sucesivas.
- ❖ **Número promedio de intentos por Transmisión:** Este parámetro, medido segundo a segundo, permite observar el número de retransmisiones necesarias para alcanzar una transmisión exitosa.
- ❖ **Tiempo promedio que permanecen las tramas en contienda:** Graficado segundo a segundo para cada AC, este parámetro permite observar detalladamente los cambios en el desempeño del algoritmo en términos de tiempo necesario para una transmisión exitosa.

Se han escogido los nodos asociados a los vehículos 72 y 190, puesto que en sus trayectorias experimentan niveles diferentes de densidad y comportamiento del tráfico vehicular y permiten, así, analizar el modo en que el desempeño de la nodo se afecta por la entrada o salida de nodos aledaños en el rango de alcance. Los niveles de congestión vehicular experimentados por dichos nodos son ilustrados por la figura 3.5 en la que se puede observar que el nodo 72 experimentó modificaciones bruscas en el nivel de congestión vehicular mientras que el nodo 190 experimentó cambios graduales en dicho parámetro.

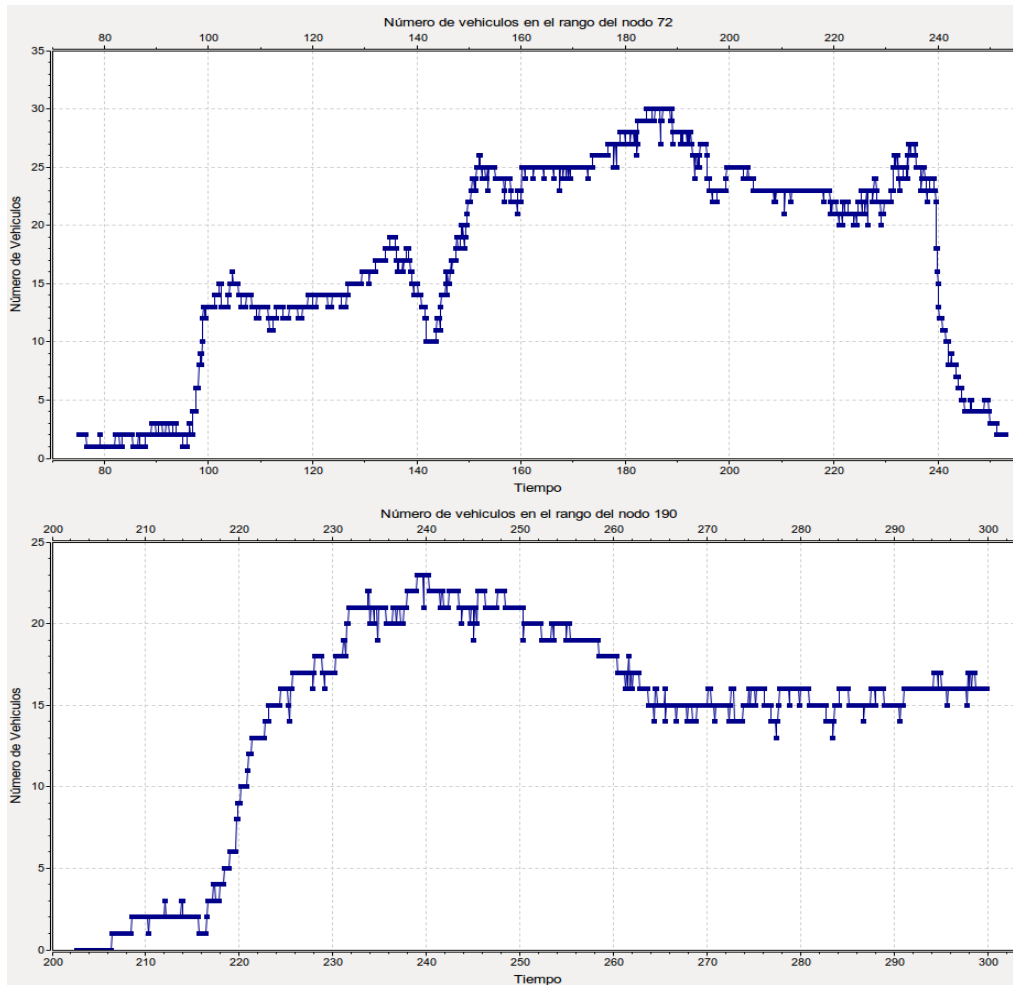


Figura 3.5 Nivel de Congestión Vehicular experimentado por los Nodos 72 y 190.

Exceptuando la gráfica de colisiones por intento de transmisión, las gráficas generadas contienen curvas correspondientes a cada categoría de acceso contenida por el nodo. Los colores asignados a las categorías de acceso son siempre los mismos en todas las gráficas y se ordenan como muestra la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Código de Colores de las AC para las gráficas. Por los Autores.

Número de Cola	Categoría de acceso	Color
1	AC_V0	Azul
2	AC_V1	Rojo
3	AC_BE	Verde
4	AC_BK	Amarillo

a. Escenario 1: Baja Congestión de Tramas.

En la figura 3.6 se muestra el número Total de Colisiones de tramas de información experimentadas por los diferentes nodos que constituyen la red VANET. El número de Colisiones de tramas para cada vehículo se reduce en el algoritmo RAG con relación al algoritmo BEB, esto se produce ya que el algoritmo BEB implementa un proceso de *Back-off* binario que ocasiona que después de una transmisión satisfactoria de un nodo, se asigne un valor pequeño a la ventana de contienda (el valor de la ventana mínima de contienda), lo que puede resultar en bajos valores de tiempo de *Back-off* y por ende mayor oportunidad de acceso al medio, debido a esto el incremento de colisiones de las tramas de información se hace inevitable. Por otro lado, el algoritmo RAG tiene en cuenta el estado actual de la competencia por el medio en la red a partir de lo cual el valor de la ventana de contienda se elige, derivando en una menor cantidad de colisiones en la red.

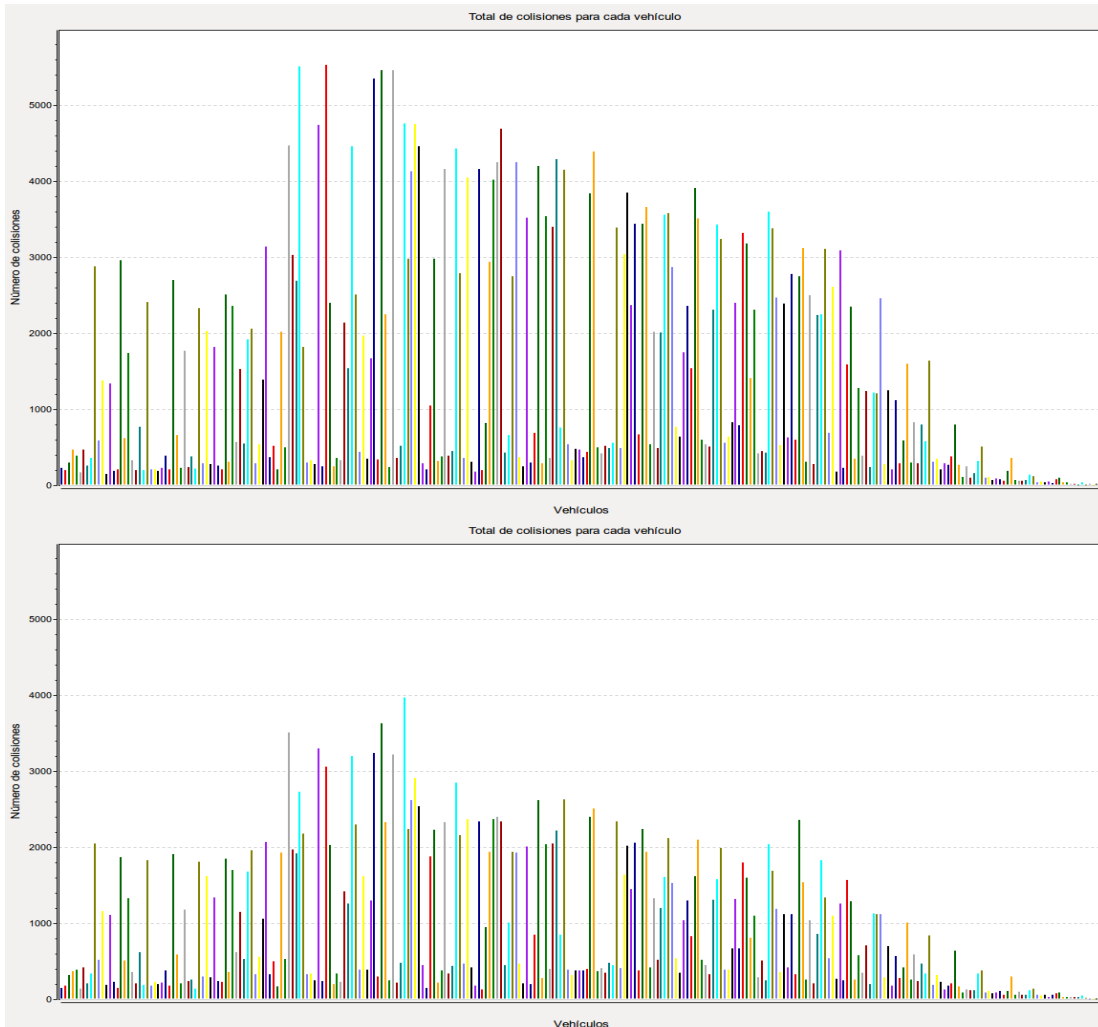


Figura 3.6 Total de Colisiones para cada Vehículo, Escenario 1.

Los resultados expuestos en la figura 3.6, presentan un rendimiento en cuanto al nivel de colisiones muy similar entre los dos algoritmos debido a que no hay un flujo muy alto de información generado por los nodos.

La figura 3.7 muestra el porcentaje de tramas descartadas por cada uno de los vehículos durante el proceso de simulación de los algoritmos BEB y RAG respectivamente. Se aprecia además que por tratarse de un contexto en el cual la congestión de tramas es baja, se descartan un porcentaje reducido de estas. Además, se encuentra al comparar los dos algoritmos que el RAG presenta, a nivel de sistema, un mejor comportamiento respecto al BEB, aunque se presentan ciertos casos aislados en los que el BEB exterioriza un proceder superior. Estos casos pueden deberse a que probablemente aquellos nodos experimentaron cambios de congestión de red, para los que la respuesta en la variación paulatina de la ventana de contienda ejecutada por el RAG no va a la par a dichos cambios, lo que puede generar descarte de tramas. Además el fenómeno anterior puede deberse a la aleatoriedad implícita en la elección del tiempo de *Back-off*.

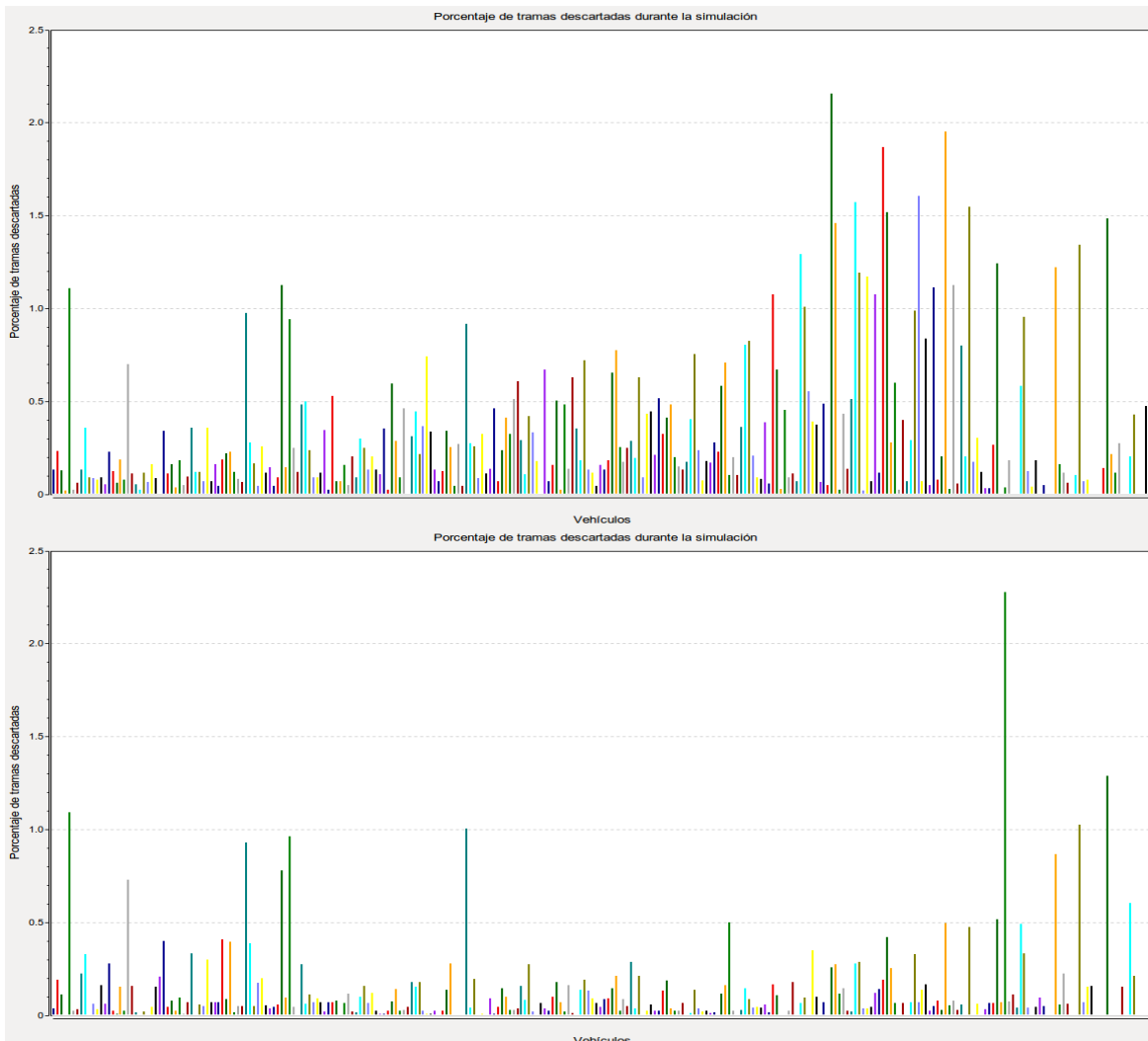


Figura 3.7 Porcentaje de tramas descartadas, Escenario 1.

En la figura 3.8 se muestra lo referente al Número Promedio de Intentos de Transmisión por cada Trama para cada uno de los nodos que componen la red VANET. Se aprecia que los intentos promedio por transmisión de las tramas se reducen para el algoritmo RAG en contraste con el BEB, alcanzando valores pico de 1,3 y 1.6 intentos de transmisión por cada trama para algunos vehículos respectivamente. Esto se explica por el hecho en que los valores de ventana de contienda son más bajos en el algoritmo BEB después de una transmisión satisfactoria, lo cual conlleva a que los nodos puedan presentar mayor oportunidad inmediata de acceso al medio compartido, pero a su vez, implica un aumento en el número de colisiones y el número de tramas que se descarten.

Por otro lado el algoritmo RAG funciona teniendo en cuenta la competencia que se encuentre aconteciendo en la red para variar los valores de la ventana de contienda, base para calcular el tiempo de *Back-off*; si cada nodo estima que el nivel de contienda es alto procurará mantener valores de ventana de contienda altos para evitar que las tramas colisionen, de esta forma postergará sus transmisiones. Si ocurre la situación en que se detectase el medio no tan congestionado por contienda, gradualmente establecerá un valor adecuado de ventana de contienda que se adapte a esta nueva situación de congestión de la red.

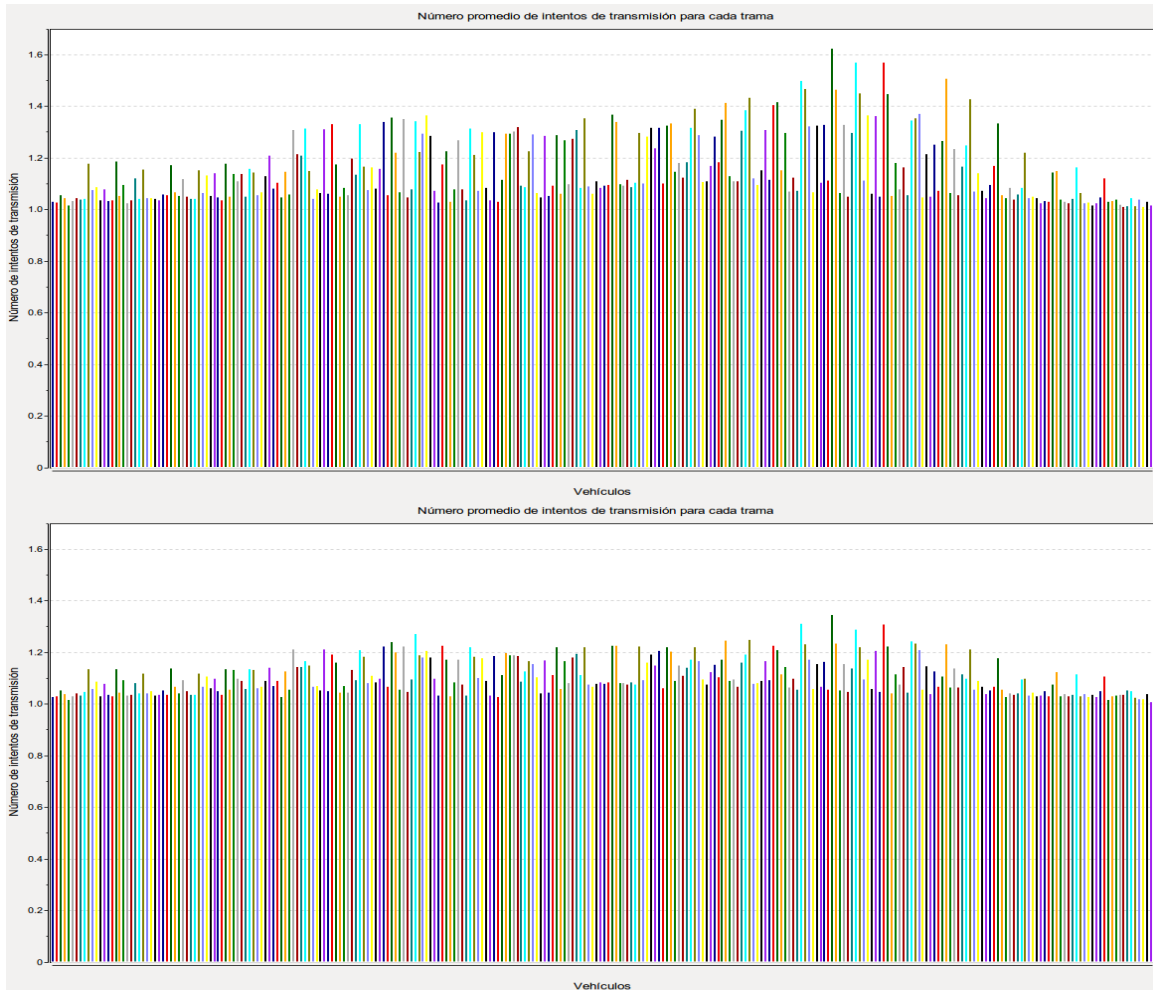


Figura 3.8 Número promedio de intentos de transmisión por trama, Escenario 1.

La figura 3.9 muestra el tiempo promedio en que las tramas tardan en superar el proceso de contienda exitosamente para cada uno de los nodos que componen la red VANET estudiada.

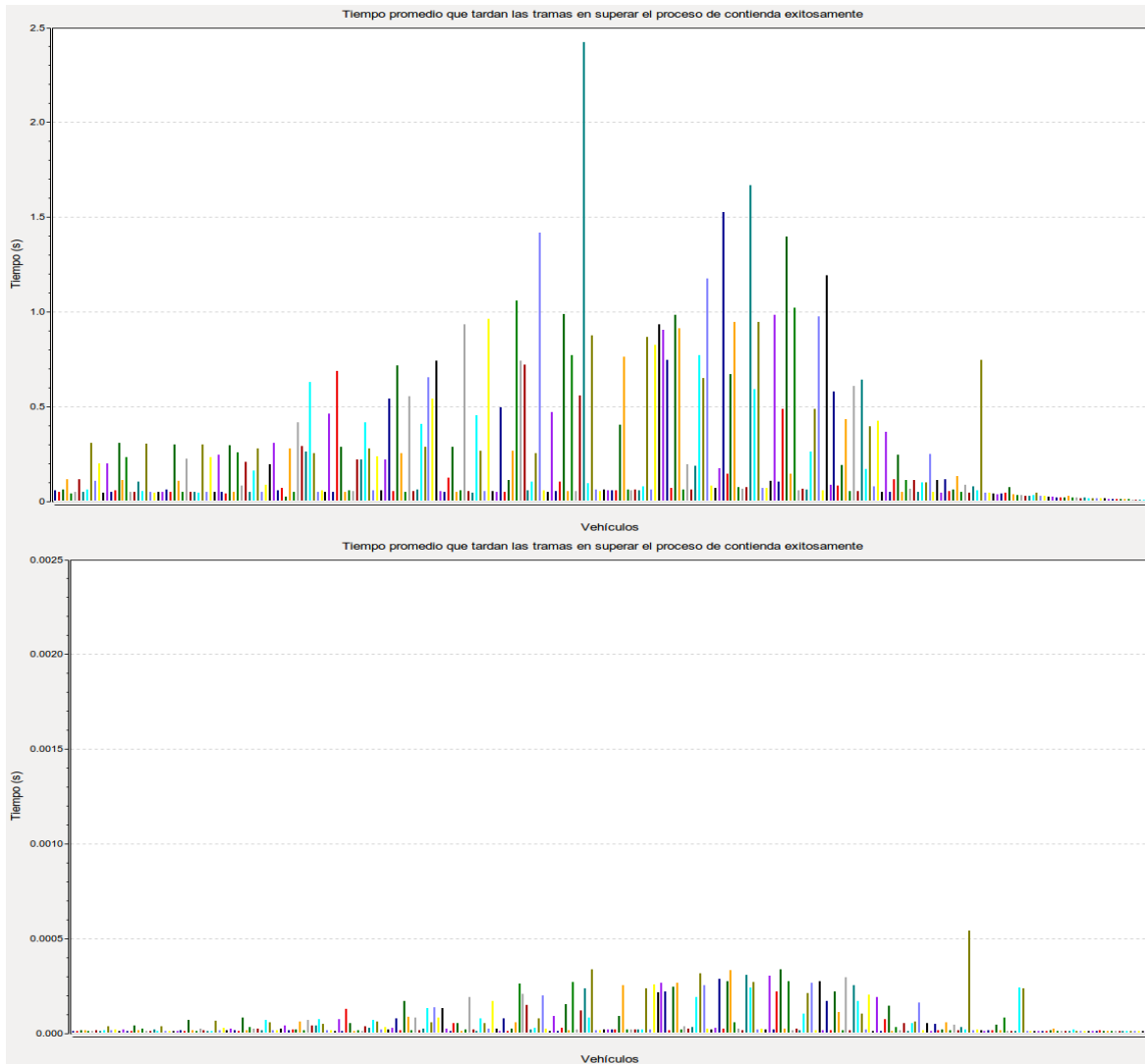


Figura 3.9 Tiempo promedio que tardan las tramas en superar el proceso de contienda exitosamente, Escenario 1.

Los resultados mostrados en la figura 3.9 demuestran que el tiempo promedio para que las tramas se transmitan exitosamente después del proceso de contienda se reduce para el algoritmo RAG, esto indica que el algoritmo RAG hace que las tramas de datos accedan al medio en menor tiempo que cuando se considera el estudio de la red desde el punto de vista del estándar IEEE 802.11p en su operación con el algoritmo BEB. Debido a que la red presenta unas condiciones de congestión de datos bajo, los valores de ventana de contienda que proporciona el RAG se adecuan a dichas condiciones, haciendo que se mejoren las condiciones de acceso al canal, es decir, reduce el riesgo de colisiones por ende de retransmisiones, brindando menor tiempo de acceso al canal a todos los nodos garantizando que dicha transmisión de información en el medio sea más eficaz.

Análisis Nodo 72.

En la figura 3.10 se muestra como varían los valores de la ventana de contienda de cada categoría de acceso tanto para el algoritmo BEB en la gráfica superior, como para el algoritmo RAG en la inferior. Cabe anotar que las gráficas mostradas en la figura 3.10 despliegan valores discretos con relación a instantes muy pequeños en el tiempo, por lo cual para la escala en que se encuentran dichas imágenes parecen ser vistas como si se tratase de gráficas continuas.

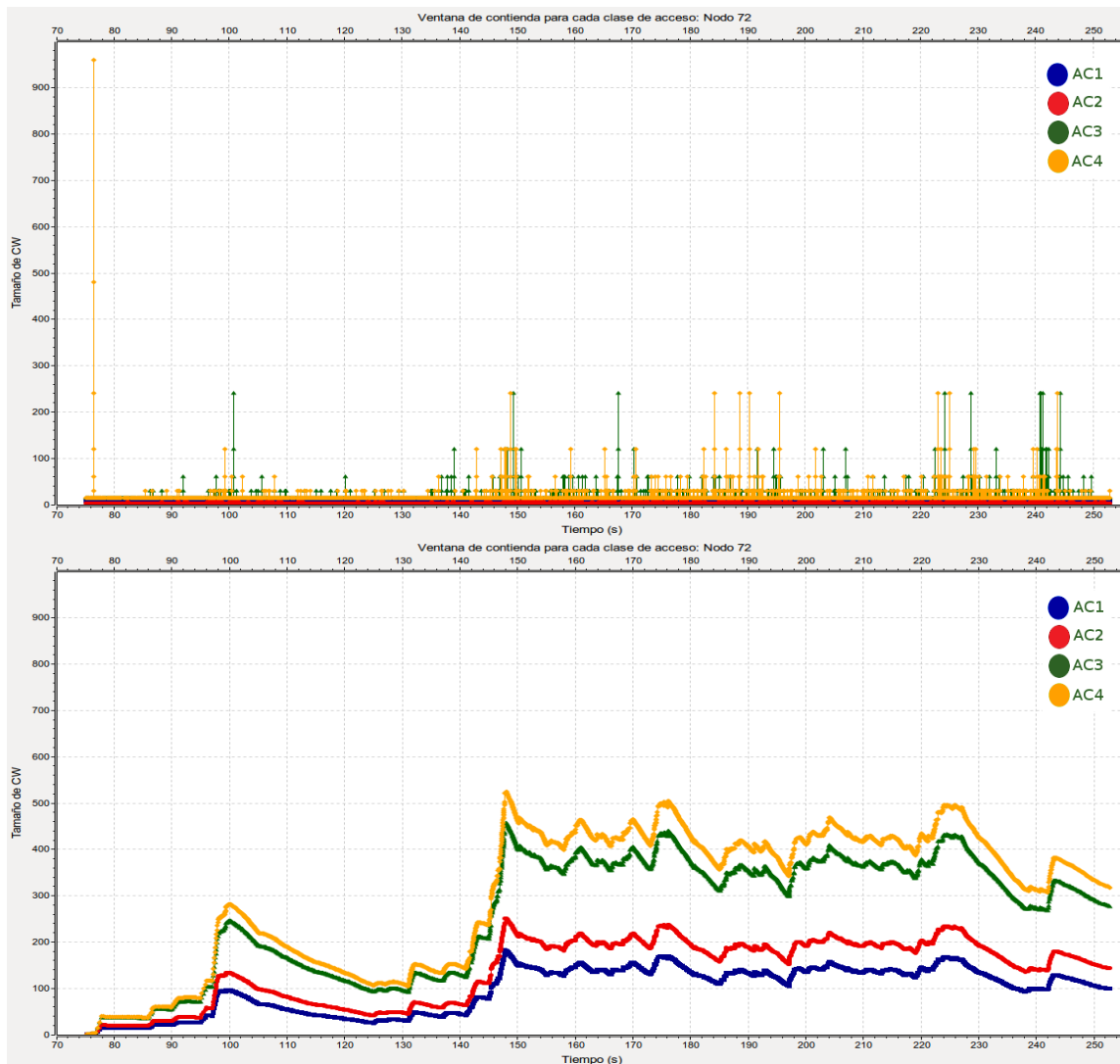


Figura 3.10 Ventana de Contienda para cada AC Nodo 72, Escenario 1.

Los resultados apreciados en la figura 3.10 muestran en la gráfica concerniente al algoritmo BEB ciertos picos con unos puntos incrustados, estos representan cada uno de los intentos que tuvo que realizar la cola respectiva antes de transmitir su trama. Se observa la situación para un mensaje de la cola con categoría de acceso 4, o sea la de más baja prioridad, que presenta 6 retransmisiones antes de transmitirse satisfactoriamente. Esta situación en especial se produce en instantes de tiempo de simulación en los que el vehículo presentó baja contienda por el

medio de acuerdo con la figura 3.5. Se descarta que las retransmisiones debido a colisiones se deban a la congestión vehicular, por lo cual se considera que se deben al grado de aleatoriedad debido al simulador.

El vehículo 72 entra en el escenario en el segundo 75 y, durante los primeros 20 segundos, ambos algoritmos muestran que las condiciones de la red permiten usar valores de ventana de contienda muy pequeños. Alrededor del segundo 100 de simulación se observa que el algoritmo BEB ejecuta cierto número de procesos de *Back-off*, incrementando la ventana de contienda por encima del valor 100 de las colas con categoría de acceso de menor prioridad, mientras que las colas de mayor prioridad (azul y rojo), mantienen valores de ventana de contienda muy bajos durante el tiempo de simulación. En el instante 100 para el caso del algoritmo RAG, la ventana de contienda de la AC de baja prioridad (color amarillo) se incrementa, alcanzando valores superiores a 200, el cual nunca es alcanzado por el algoritmo BEB. Entre el segundo 108 y el segundo 135 hay un periodo en el que los nodos experimentan pocas colisiones; durante dicho periodo de tiempo, el algoritmo BEB se mantiene usando valores bajos de ventana de contienda. El algoritmo RAG durante el mismo periodo se encuentra cambiando gradualmente el valor de su ventana de contienda, hasta alcanzar valores altos para los instantes sucesivos debido a que este algoritmo implementa el proceso del juego gradiente que implica un cambio progresivo en la elección de la ventana de contienda de acuerdo al nivel de contienda que se estima, desembocando en un incremento de la ventana por el hecho de la detección de un aumento en los niveles de congestión de la red.

Entre el segundo 150 y el segundo 250 el comportamiento de la ventana de contienda en ambos algoritmos revela que hay un mayor número de colisiones que durante el periodo anterior. El algoritmo RAG se encuentra, nuevamente, adoptando un valor de ventana de contienda superior a la mayoría de los picos observados en el algoritmo BEB. Durante este periodo, las condiciones de contienda de la red se mantienen estables, lo cual se observa en cambios cortos de la ventana de contienda correspondiente al algoritmo RAG y en la recurrencia de picos de ventana de contienda alta en el algoritmo BEB.

La cantidad de Colisiones por Intento de Transmisión, graficada en la figura 3.11, revela los resultados obtenidos del estudio de los algoritmos correspondientes a cada caso de análisis para el nodo 72.

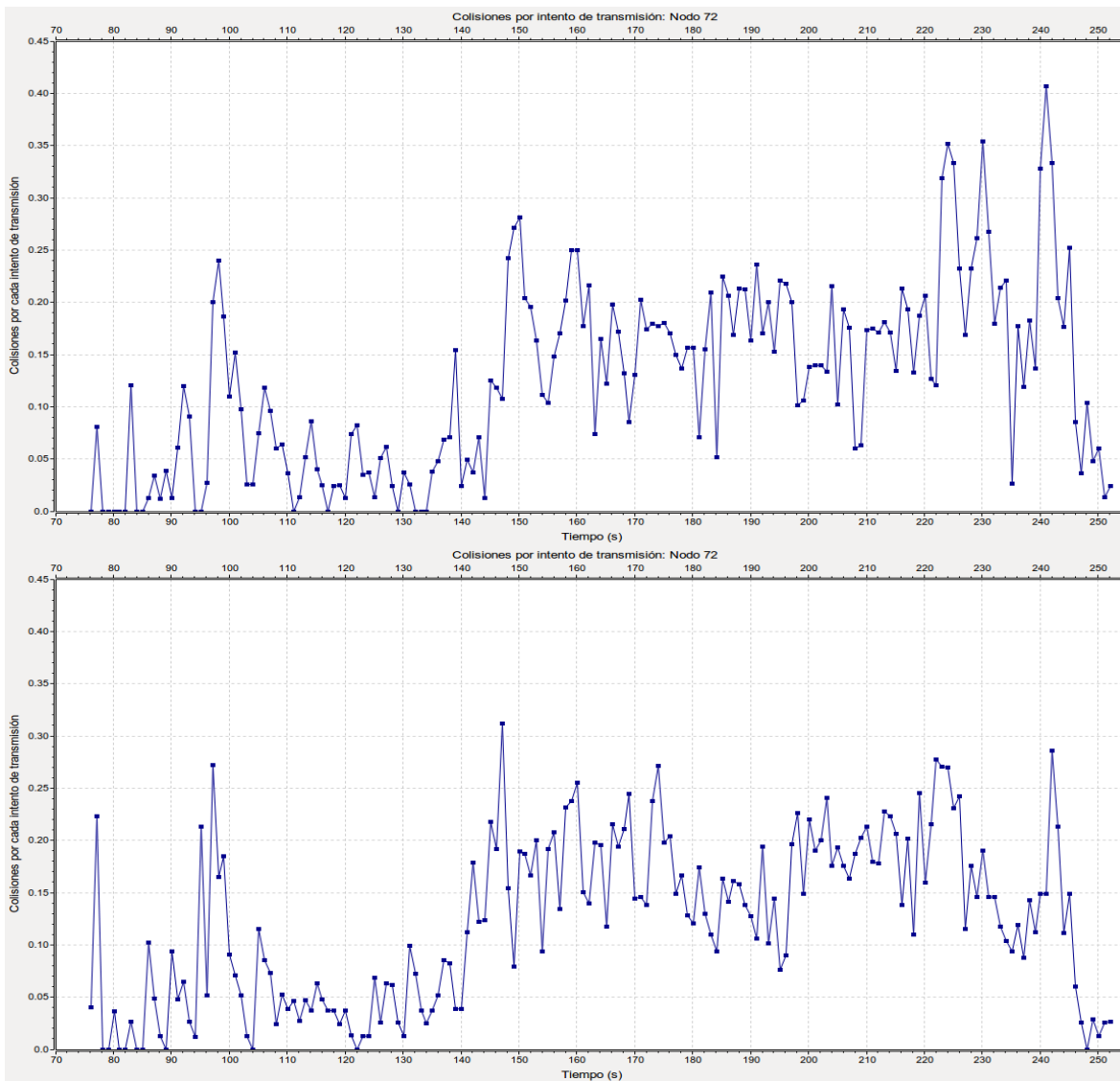


Figura 3.11 Colisiones por intento de Transmisión (CpTx), Nodo 72, Escenario 1.

El criterio de desempeño Colisiones por cada Intento de Transmisión denotado por la sigla “CpTx”, medido a segundo en correspondencia a los resultados plantea que el grado de colisión sufrido por las tramas de información transmitidas por el nodo 72, mantiene bajos índices para ambos casos, tanto para el algoritmo BEB como para el RAG, debido a que hay baja congestión de mensajes en la red.

Los resultados revelan que el algoritmo BEB alcanza 3 picos altos en los tiempos de simulación 224s, 230s y 241s con 0.352 CpTx, 0.353 CpTx y 0.407 CpTx respectivamente; picos de esta altura no son alcanzados en ningún instante de tiempo por el algoritmo RAG. En los tiempo de simulación 77s, 97s y 147s, que corresponden a la entrada del nodo a la zona de simulación y a los dos incrementos de vehículos cercanos observados en la figura 3.5, se registran picos de altura media en todos los cuales el algoritmo BEB obtiene valores ligeramente mejores que el algoritmo RAG. Durante el resto del periodo simulado se observa que ambos algoritmos oscilan

alrededor de puntos promedio muy similares, aunque es notable que el algoritmo BEB presente oscilaciones más bruscas alrededor de dichos puntos.

Se deduce que el grado de colisión que experimenta el nodo al ejecutar algoritmo RAG para el proceso de contienda presenta en términos generales un mejor rendimiento en contraste al proceso realizado por el algoritmo BEB que utiliza el estándar IEEE802.11p, porque como exteriorizó la figura 3.10, los valores que plantea el algoritmo RAG para la ventana de contienda de las diferentes colas que contienen los mensajes con distinta categoría o prioridad de acceso, varía gradualmente en respuesta a la competición por el medio compartido en la red, presentando mayores valores de ventana de contienda, lo que ocasiona que las colisiones se reduzcan.

La gráfica de *Throughput* medido en ACKs recibidos segundo a segundo, en la figura 3.12, muestra las oscilaciones que presenta el *Throughput* para cada una de las colas que aluden a las distintas prioridades de la información.

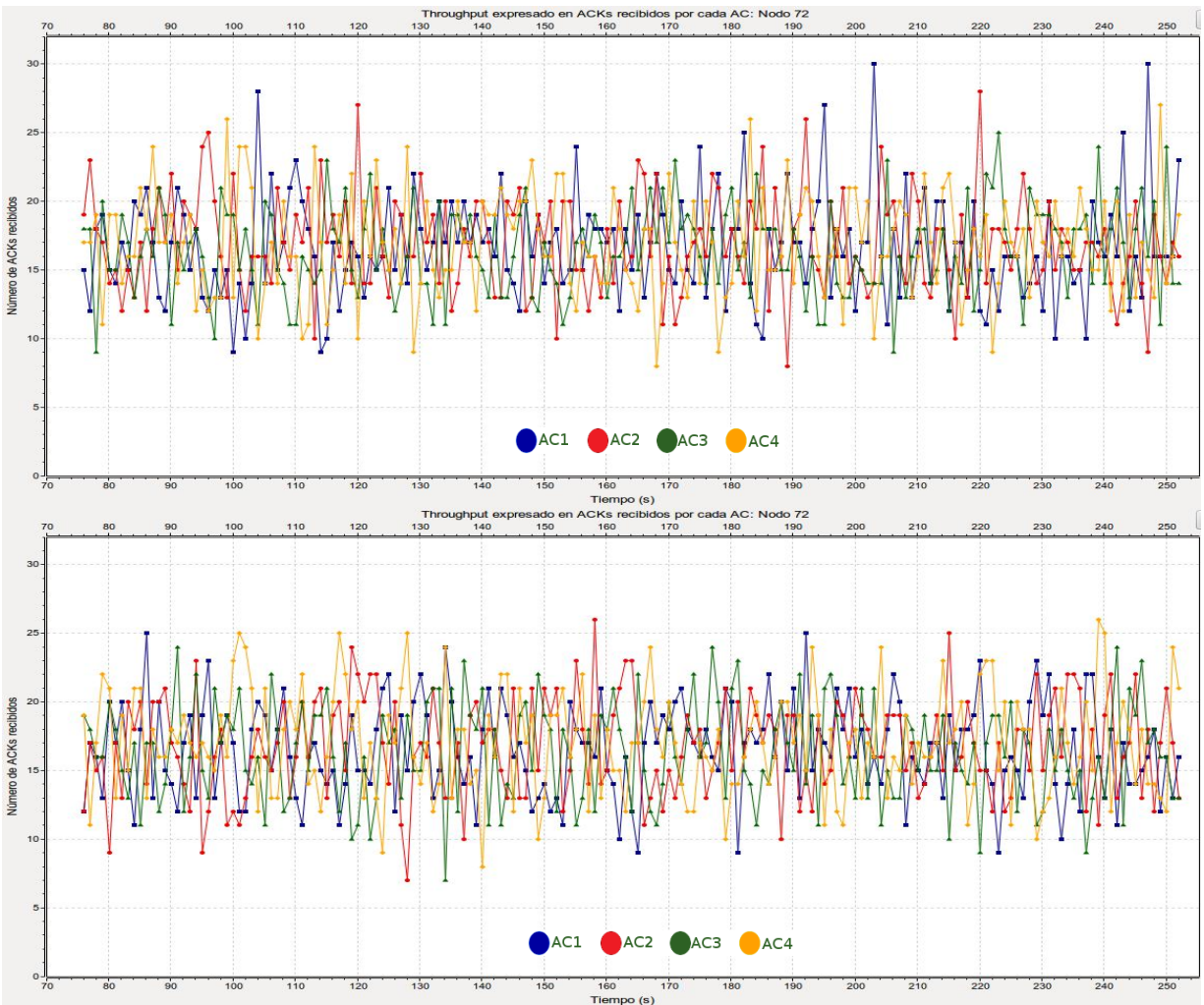


Figura 3.12 *Throughput* medido en ACKs por segundo para cada AC, Nodo 72, Escenario 1.

Los resultados en la figura 3.12 evidencian que la cola con más alta prioridad identificada con el color azul, presenta oscilaciones bruscas en el caso del algoritmo BEB, que muestra 2 picos de 30 ACKs por segundo en los tiempos 204 segundos y 246 segundos. Exceptuando lo anterior, el desempeño en términos de *Throughput* es muy similar entre los dos algoritmos. Esto se debe a que todas las colas reciben, en promedio, la misma cantidad de tramas para ser transmitidas en un contexto de baja congestión de la red, con lo cual las diferencias en el desempeño de los algoritmos no son apreciables.

El número de tramas descartadas por el nodo 72, ilustrada por la figura 3.13, muestra que ambos algoritmos descartaron un número muy reducido de tramas. Las gráficas en la figura 3.13 muestran como de manera acumulativa se estima el valor de las tramas descartadas por el Nodo 72 para las distintas categorías de Acceso AC. El valor máximo de tramas descartado por cada AC corresponde al valor más alto alcanzado.

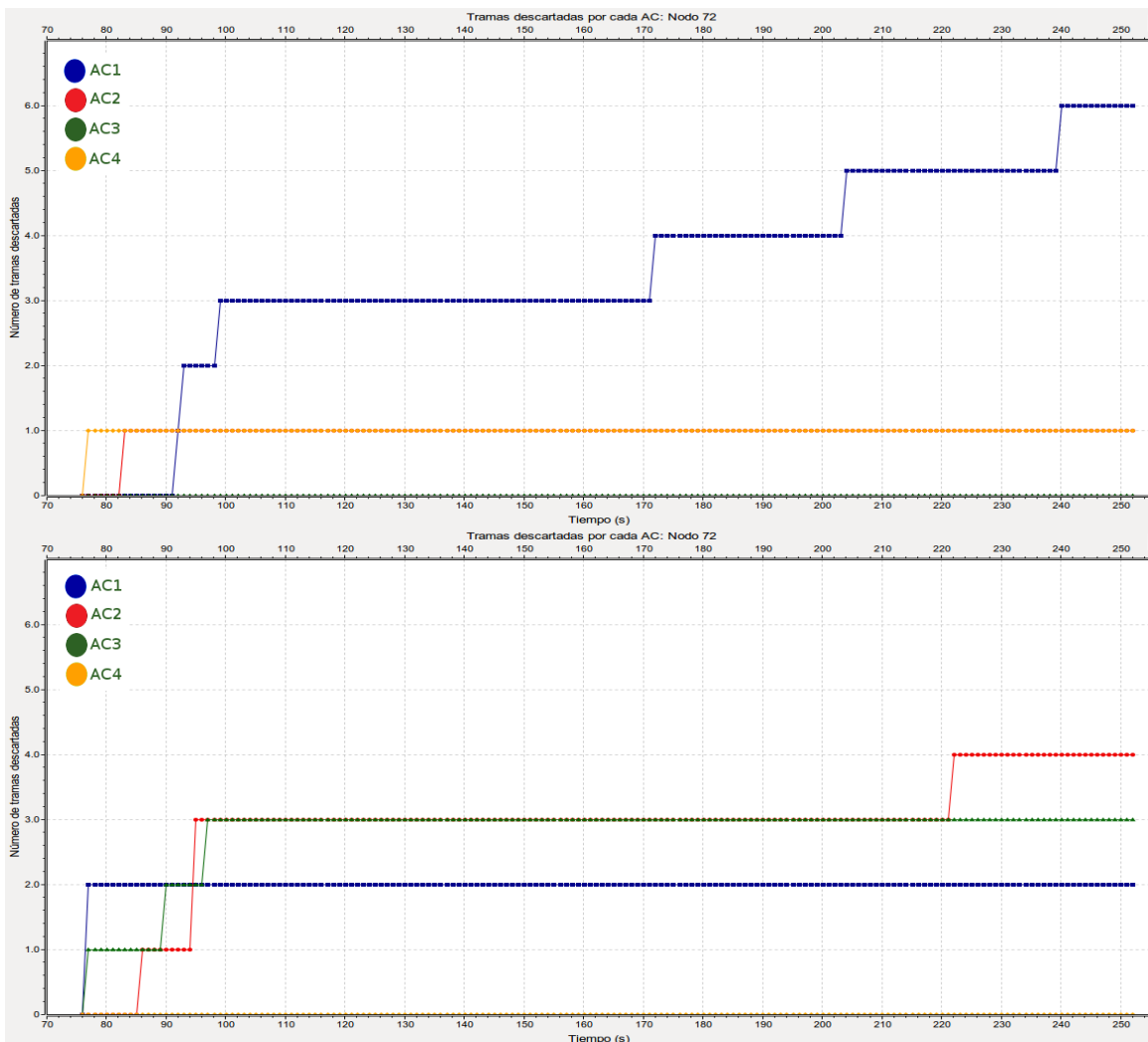


Figura 3.13 Tramas Descartadas por cada AC, Nodo 72, Escenario 1.

Teniendo en cuenta los resultados de la figura 3.13 al realizar la suma de las tramas descartadas por cada AC se encontró que el algoritmo RAG descartó un total de 9 tramas mientras que el algoritmo BEB descartó 8 tramas. Es notable que para el algoritmo BEB la cola de mayor prioridad denotada por el color azul, experimentó la mayor cantidad de tramas descartadas, porque los valores de la ventana de contienda son más bajos respecto a las otras colas de menor prioridad, lo que puede generar un tiempo de *Back-off* más bajo. Adicionalmente se observa que la cola de más baja prioridad descartó una sola trama en todo el tiempo de simulación.

Para el caso del algoritmo RAG se encontró en las tramas de la cola con más alta prioridad una reducción en el número de tramas descartadas respecto al caso BEB, además de acuerdo a la figura 3.13 el algoritmo RAG presentó una menor cantidad de tramas que se eliminaron para la cola con prioridad más alta, lo que es beneficioso para una red VANET, ya que en ciertas aplicaciones de este tipo de redes como por ejemplo advertencias de accidente a los demás vehículos (datos que se sitúan en esta cola), se trata de información de estado crítico que necesita ser transmitida eficazmente, por lo cual, no es conveniente ni adecuado que se presenten altos índices de descarte de este tipo de mensajes.

La figura 3.14, muestra los resultados referentes al Número promedio de intentos de transmisión por cada AC para el nodo 72 para los casos de análisis correspondientes. Durante buena parte del tiempo graficado, el algoritmo RAG presenta un menor número de intentos de retransmisión.

El comportamiento en cuanto al Número de Intentos Promedio por Transmisión ofrece una visión acerca del grado de dificultad respecto a la contienda que sufrieron los paquetes de las diferentes colas en su proceso por transmitirse a través del medio inalámbrico después de superar el proceso de contienda interna. Dicho grado de dificultad se evidencia en los intentos de retransmisión que sufre la información después de las colisiones debido a la configuración de sus valores de tiempo de *Back-off*. Para el caso del algoritmo BEB las colas de mayor prioridad sufren los efectos de las colisiones de una manera más contundente porque sus valores de ventana de contienda bajos favorecen el acceso al medio, pero dejan la posibilidad de un mayor número de colisiones, por lo que se da a lugar un valor de intentos promedio de transmisión relativamente altos en ciertos instantes de simulación en los que se presenta un incremento en la densidad de vehículos adyacentes como lo ilustra la figura 3.5.

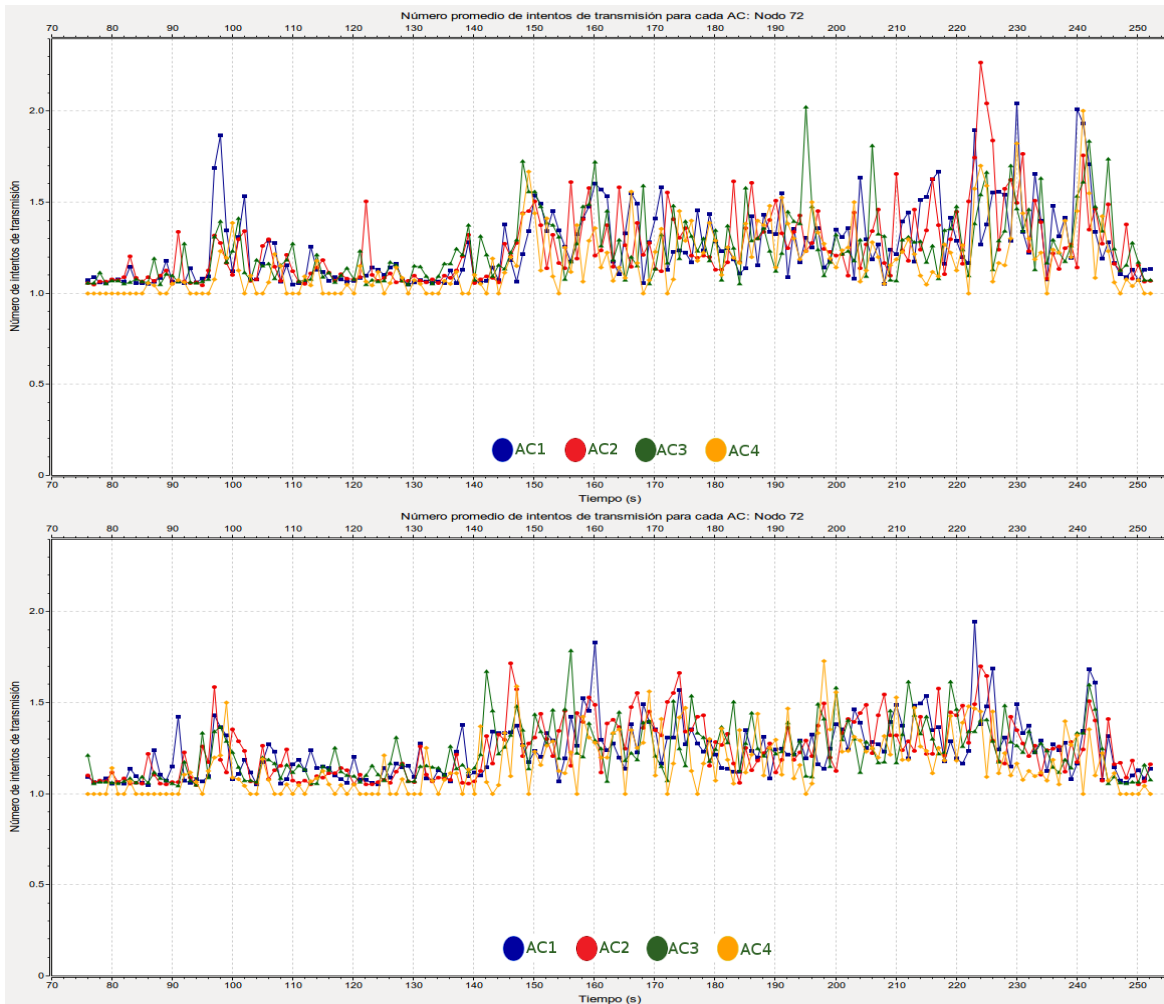


Figura 3.14 Número promedio de Intentos por transmisión, Nodo 72, Escenario 1.

Por otro lado el algoritmo RAG permite observar la correspondencia con los resultados de la figura 3.13, porque hace que las transmisiones de las tramas de información de la cola de mayor prioridad se aplacen un poco más con respecto al algoritmo BEB reduciendo las colisiones, favoreciendo a que información de más alta prioridad se transmita con menor incidencia en el descarte o eliminación de tramas.

El tiempo que permanece una trama en el proceso de contienda, graficado en la figura 3.15, muestra como es el comportamiento de los algoritmos analizados. El algoritmo RAG le toma mucho más tiempo superar el proceso de contienda, llegando en algunos casos superiores a 0.006 segundos, mientras que el algoritmo BEB supera los 0.002 segundos sólo dos veces. Este hecho plantea que el algoritmo BEB al asignar valores de ventana de contienda más bajos después de una transmisión satisfactoria, podrían generar tiempos de *Back-off* pequeños que ocasionarían que las tramas de datos superen de manera más rápida un proceso de contienda posterior, pero esto conllevaría a inconvenientes como una mayor ocurrencia de colisiones y hasta un incremento en el descarte de las tramas de información.

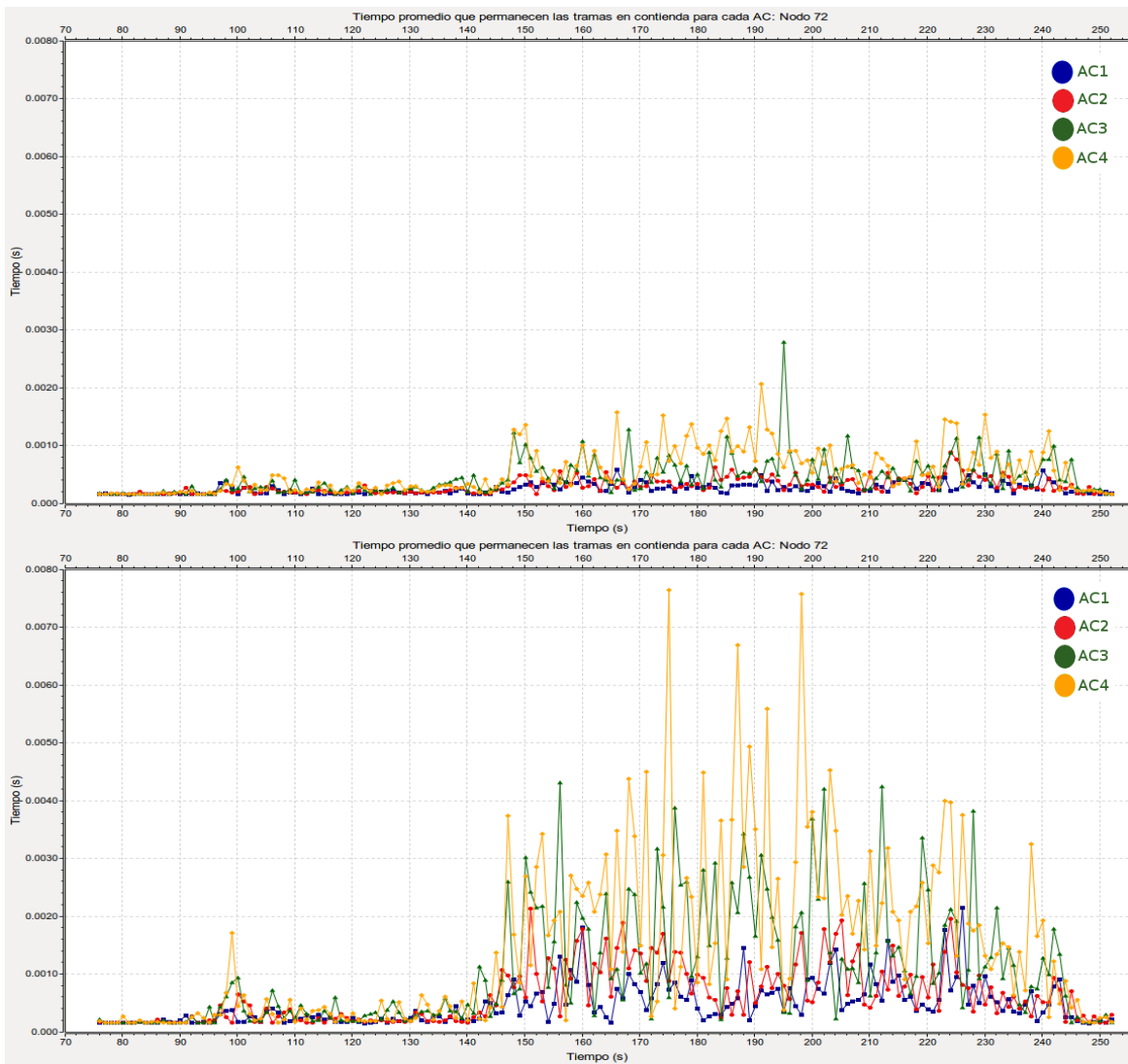


Figura 3.15 Tiempo promedio que permanecen las tramas en Contienda para cada AC, Escenario 1.

Análisis Nodo 190.

La figura 3.16 muestra las variaciones de los valores de la ventana de contienda para las diferentes clases de acceso para el nodo 190.

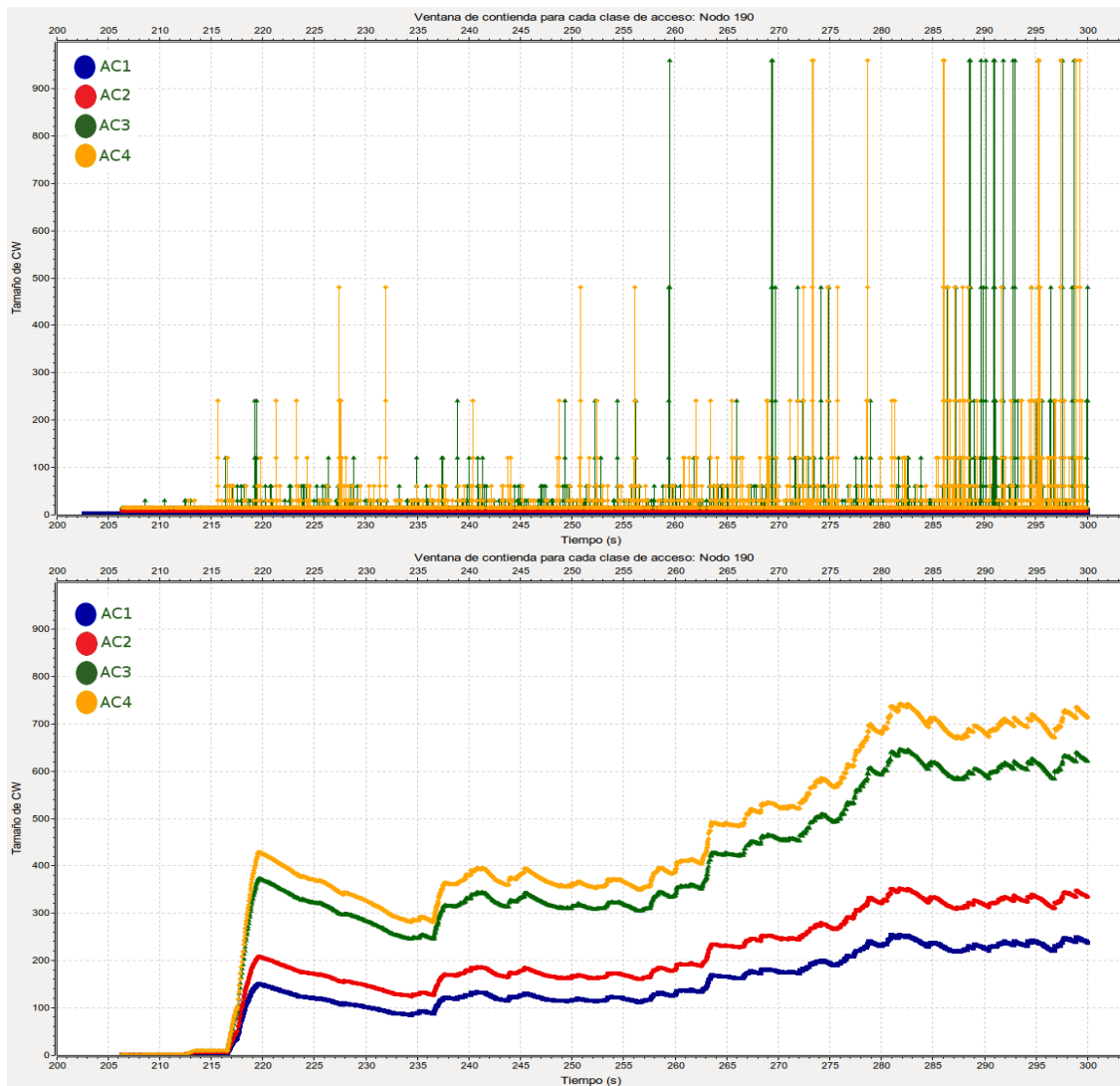


Figura 3.16 Ventana de Contienda para cada Clase de Acceso, Nodo 190, Escenario 1.

Los resultados mostrados en la figura 3.16 revelan que el nodo 190 entra en la red aproximadamente en el segundo 203 y empieza a experimentar un nivel bajo de contienda aproximadamente hasta superar el segundo 215 a partir del cual los valores de ventana de contienda para las distintas clases de acceso para los dos algoritmos comienzan a incrementarse. Los resultados manifiestan como el algoritmo RAG presenta una variación de los valores de ventana de contienda menos abruptos con respecto al algoritmo BEB, debido a que este último emplea un mecanismo binario de actualización de ventana de contienda, mientras que el algoritmo RAG de acuerdo a la estimación de las variaciones del nivel de competencia en su alrededor estima los valores de la ventana de contienda para las distintas categorías de Acceso.

El número de colisiones por intento de transmisión experimentadas por el vehículo 190 durante la simulación, se ilustra en la figura 3.17 para los algoritmos BEB y RAG correspondientemente.

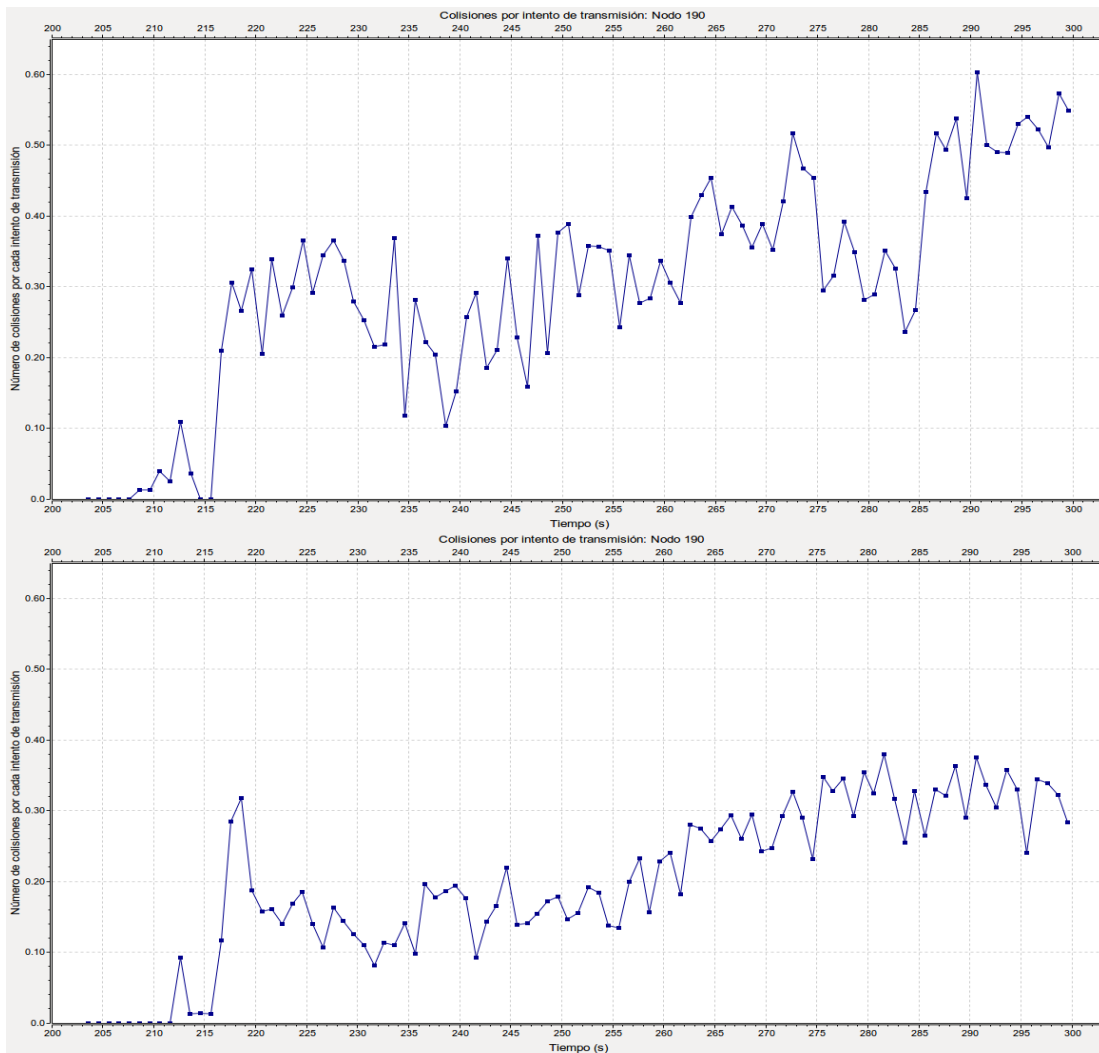


Figura 3.17 Colisiones por intento de transmisión, Nodo 190, Escenario1.

Los resultados muestran un mejor desempeño del algoritmo RAG durante todo el intervalo de tiempo graficado, alcanzando un valor máximo de 0.38 CpTx, mientras que por su parte, el algoritmo BEB alcanza valores de hasta 0.6 CpTx. Se observa, además, que el algoritmo BEB experimenta oscilaciones más bruscas que aquellas experimentadas por el algoritmo RAG. Teniendo en cuenta los resultados hallados en la figura 3.16 del comportamiento de la ventana de contienda para las distintas colas de información, el algoritmo RAG permite que el grado de colisión que experimentan dichas colas de información se reduzca respecto al efecto producido por el uso del algoritmo BEB, porque los valores que el algoritmo RAG asigna a las ventanas de contienda son altos, lo que puede generar tiempos de *Back-off* que encaminen a postergar más los intentos de transmisión en el acceso al medio, reduciendo con ello como se observa de manera notable el índice de colisiones experimentado.

El desempeño correspondiente al vehículo 190 en términos de *Throughput*, mostrado en las gráficas de la figura 3.18 oscila en ambos casos alrededor de 16 ACK por segundo. Los picos más bajos de *Throughput* en la gráfica correspondiente al algoritmo BEB son alcanzados en el segundo 221 y el segundo 237 por la cola 2 y la cola 1 respectivamente; en ambos casos se

registra una medición de 7 ACK por segundo. En el caso del algoritmo RAG el pico más bajo de *Throughput* es alcanzado en el segundo 289 por la cola 3 también con 7 ACK.

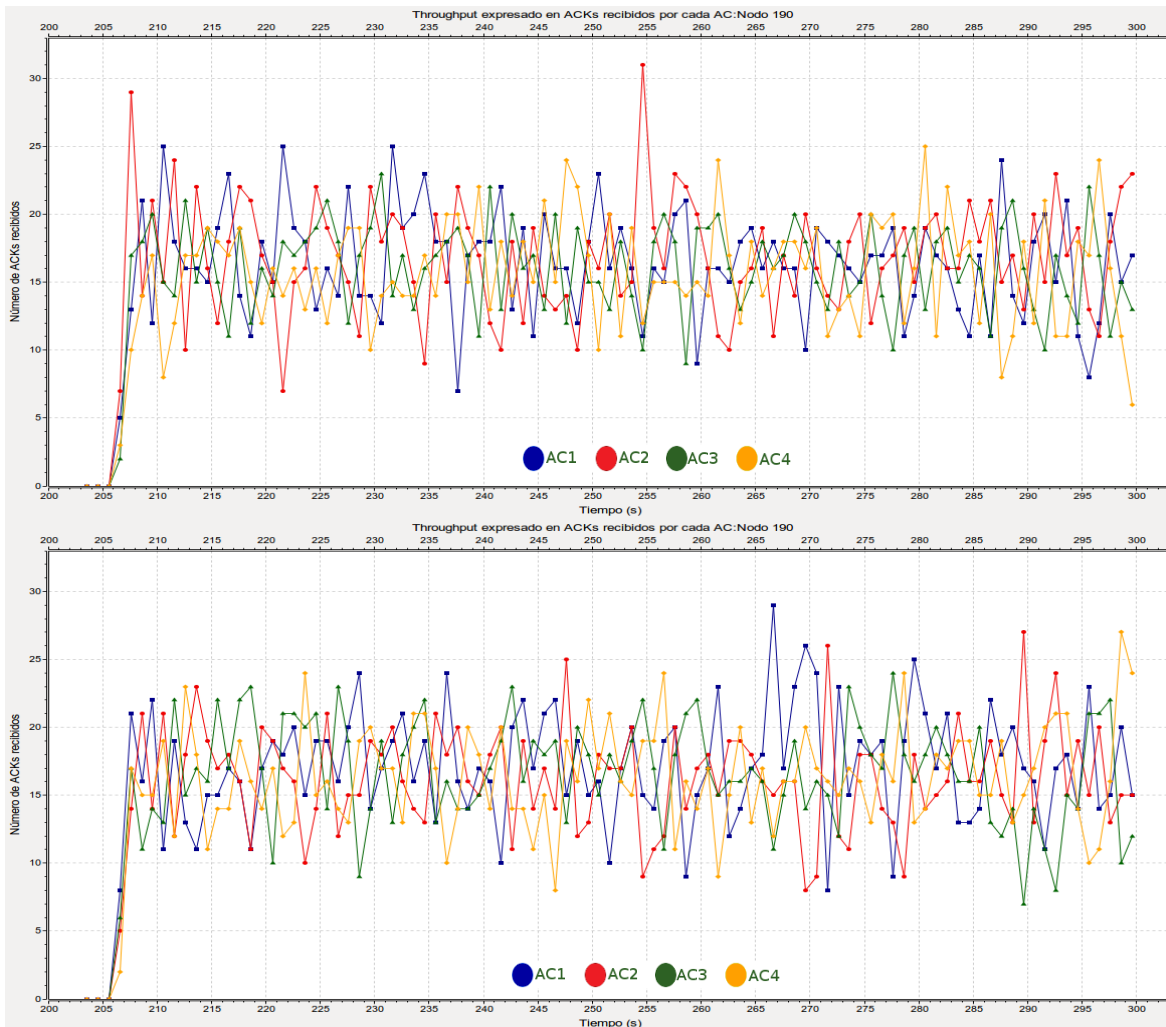


Figura 3.18 *Throughput* medido en ACK por cada AC, Nodo 190, Escenario 1.

Los resultados de *Throughput* demuestran que en términos generales el volumen de información que se proporciona al canal debido a la utilización de los algoritmos de BEB y RAG resulta semejante. Sin embargo al hacer una inspección más detallada se observa que en el algoritmo RAG las colas con prioridad más baja experimentaron un incremento paulatino en el volumen de paquetes que fueron enviados al medio respecto al caso BEB, con lo cual, el algoritmo RAG mediante la configuración de los valores de ventana de contienda que asignó a dichas colas, permitió que accedieran y pudieran enviar mayor flujo de información. Esto conlleva a plantear que el algoritmo RAG permite una descongestión rápida del medio de transmisión cuando este se encuentra ocupado por tramas de baja prioridad que se evacuan el medio inalámbrico rápido ya que sus valores de *Back-off* resultan más convenientes que los planteados por el algoritmo BEB.

La figura 3.19 exhibe los resultados referentes al número de tramas descartadas por el nodo 190, encontrando una diferencia notable entre los algoritmos considerados. La gráfica correspondiente al algoritmo BEB muestra que la cola 1 (mayor prioridad denota con azul) descartó en total 39 tramas, siendo la cola que más experimentó tal fenómeno. Esto se debe a que en el algoritmo BEB la cola de mayor prioridad amplía su ventana de contienda hasta un valor máximo de 7, con lo cual se hace susceptible de sufrir colisiones. En total para el algoritmo BEB se descartaron 77 tramas, mientras que el algoritmo RAG descartó 4 tramas.

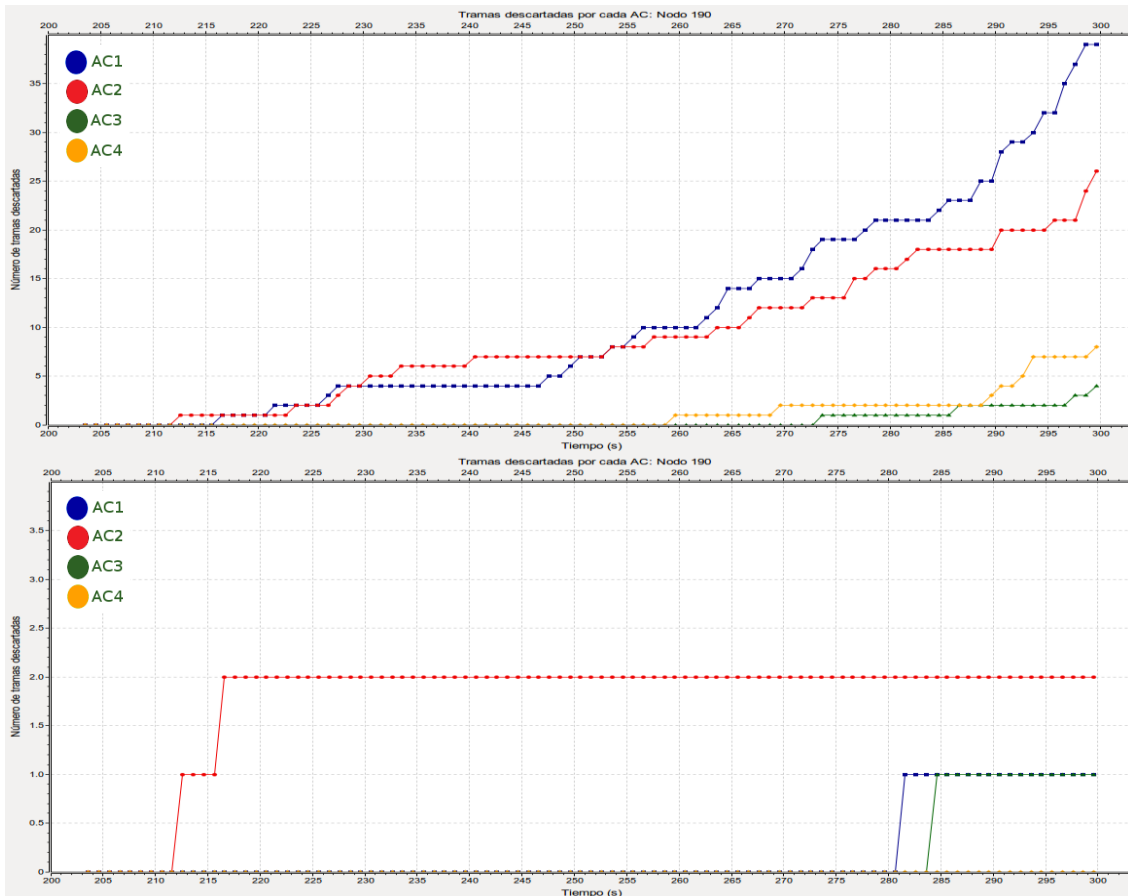


Figura 3.19 Tramas descartadas por cada AC, Nodo 190, Escenario 1.

De acuerdo a los resultados presentados en la figura 3.19 se encuentra que el algoritmo RAG presenta un proceder mejor para todas las colas de información manteniendo niveles bajos en el número de tramas descartadas. Se halla que la configuración de los valores de *Back-off* dados para el nodo 190 en la utilización del algoritmo RAG evita que se produzcan colisiones excesivas de información con los mensajes de información de vehículos contiguos, que puedan desencadenar en descarte de tramas, permitiendo que la información se pueda transmitir de una manera más eficaz.

El desempeño observado en las gráficas que componen la figura 3.20 muestra una similitud general entre los algoritmos considerados, sin embargo se aprecia claramente para cada una de las colas con distinta prioridad, que el algoritmo BEB experimenta variaciones más bruscas y

picos más elevados que aquellos experimentadas por el algoritmo RAG. Esto plantea como es el comportamiento de la accesibilidad de las tramas de datos al medio; valores más altos de intentos promedio de transmisión conllevan a mayores situaciones de colisión de información. Como se aprecia en la figura 3.20, el caso RAG presenta una cantidad menor de intentos de transmisión, es decir, que el número de colisiones decreció y por ende el descarte de información. Este permite afirmar que el algoritmo RAG admite una mayor oportunidad de acceso al medio con una tasa de colisiones y descarte mínima lo que asegura una transmisión de datos más fiable respecto al algoritmo BEB.

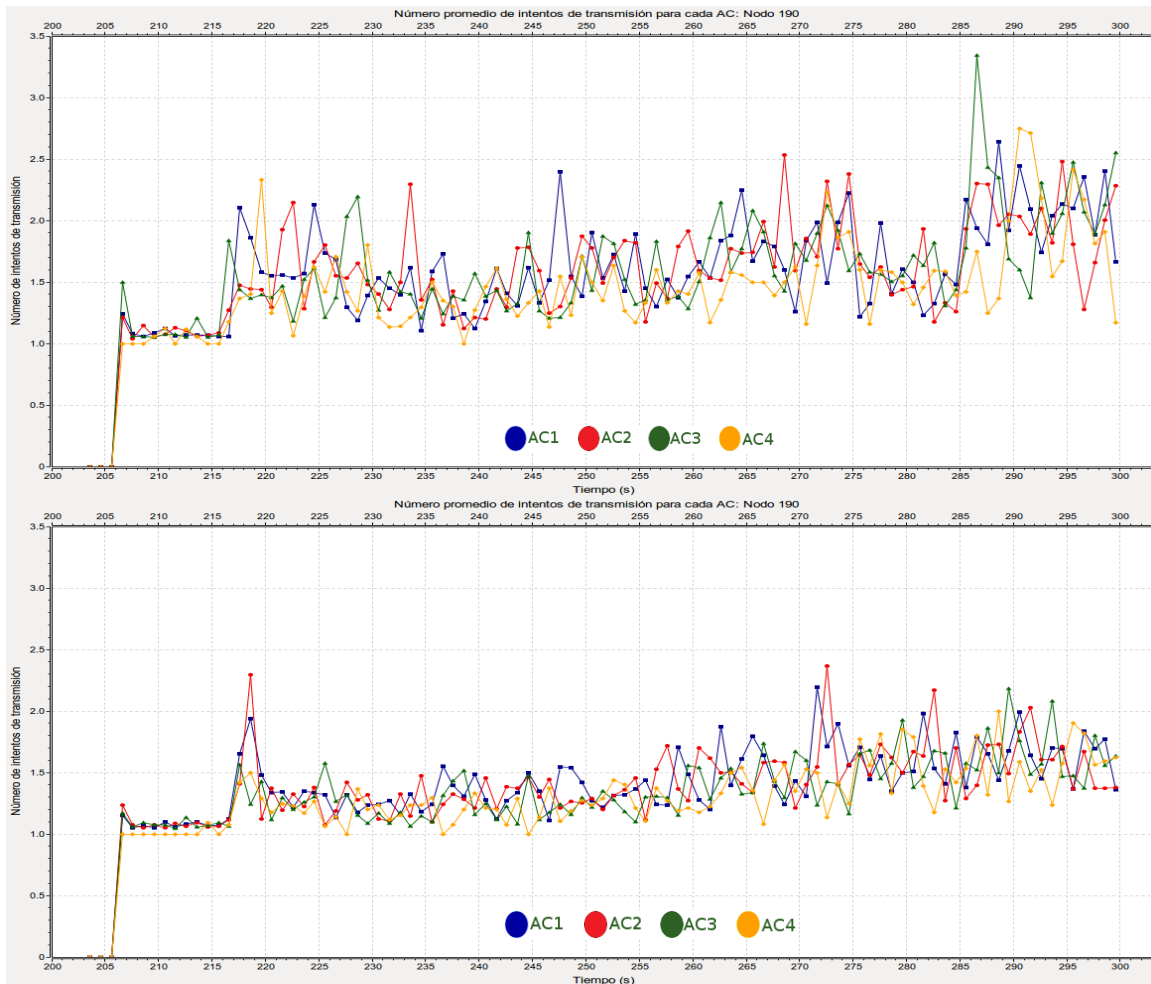


Figura 3.20 Número Promedio de intentos de Transmisión por cada AC, Nodo 190, Escenario 1.

En términos de tiempo en contienda, en las gráficas mostradas por la figura 3.21 se encuentra menores valores de tiempo promedio de permanencia en contienda de las diferentes AC por parte del algoritmo BEB que experimenta tiempos menores de manera consistente durante todo el tiempo de simulación.

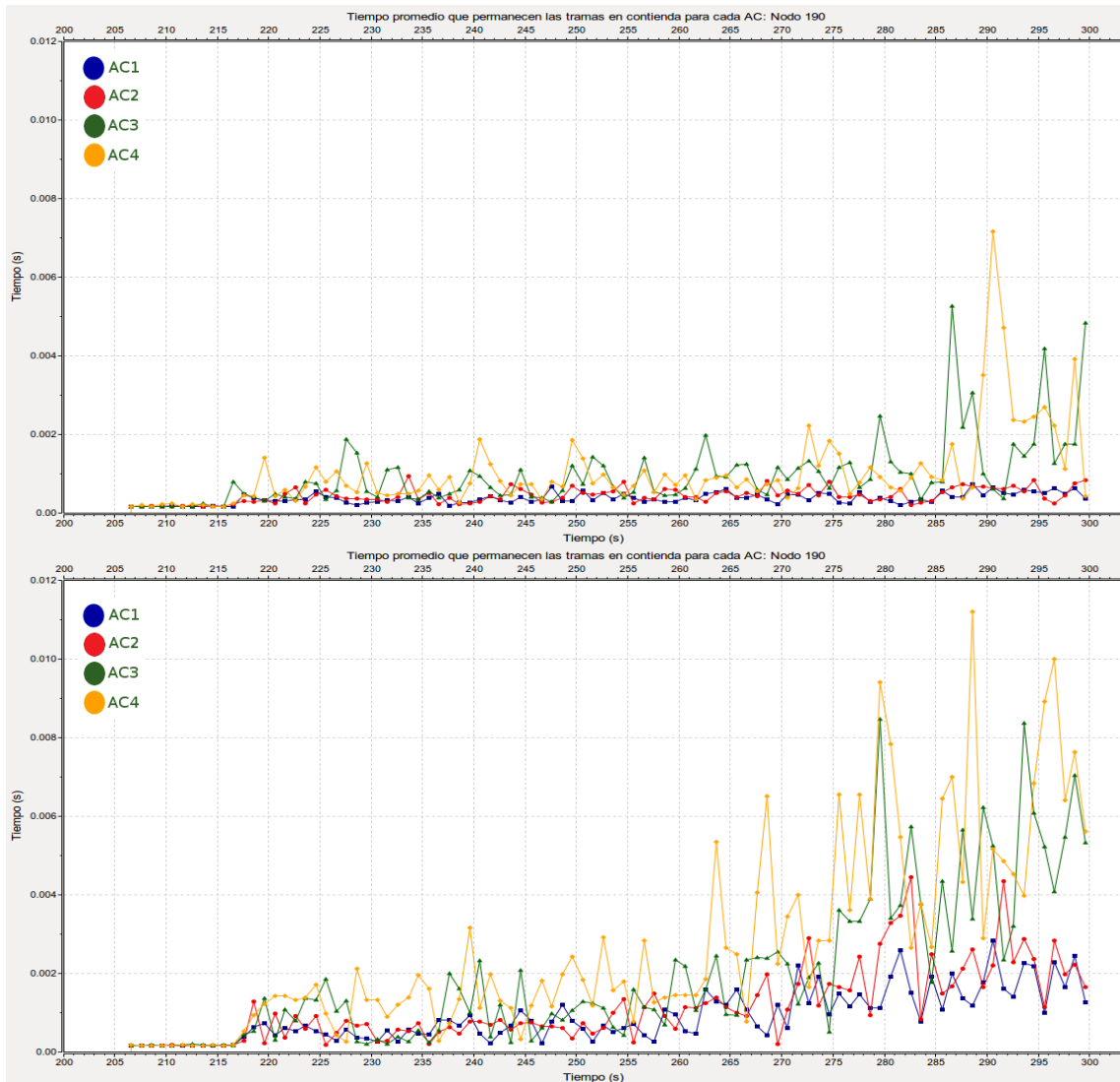


Figura 3.21 Tiempo promedio que las tramas permanecen en contienda para cada AC, Nodo 190, Escenario 1.

Los resultados mostrados en la figura 3.21 exponen que las tramas para el algoritmo RAG se demoran más tiempo en superar el proceso de contienda y superar satisfactoriamente la competencia por el medio con los otros vehículos, después de que las colas han ganado la contienda interna. Los valores de ventana de contienda son muy bajos después de transmisiones exitosas que asigna el algoritmo BEB en relación a aquellos planteados por el algoritmo RAG, lo que ofrece que se pueda acceder de manera más rápida al medio, pero con el determinante de un riesgo muy alto de experimentar retransmisiones debido a colisiones y en última instancia, descarte de información.

b. Escenario 2: Alta Congestión de Tramas

El número total de colisiones registradas por cada nodo a lo largo de la simulación es mostrado en la figura 3.22.

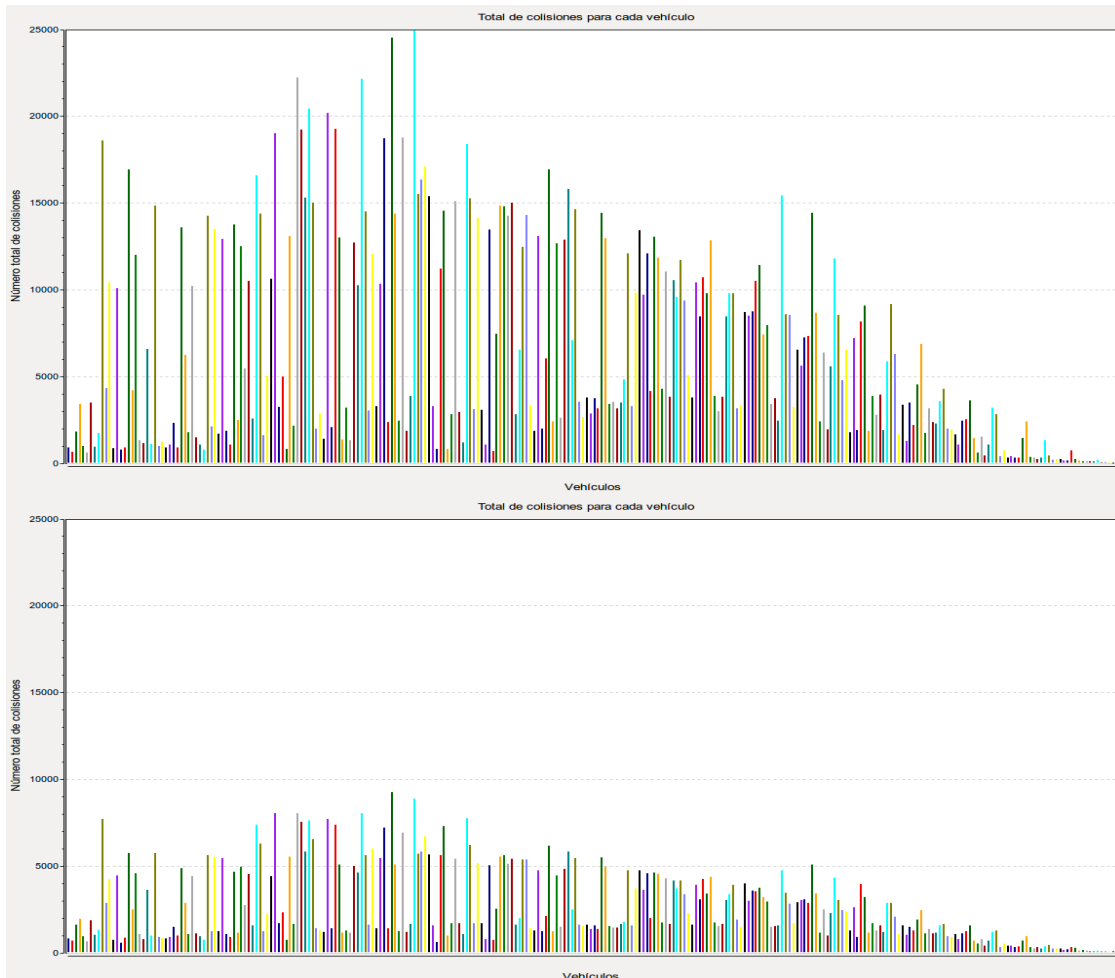


Figura 3.22 Total de Colisiones para cada vehículo, Escenario 2.

En la figura 3.22 se observan diferencias entre las 2 gráficas así:

- Los nodos que usando el algoritmo BEB registraron un número de colisiones superior a 1000 alcanzaron un mejor desempeño usando el algoritmo RAG, llegando a experimentar reducciones en el nivel de colisiones hasta un 64%.
- Los nodos que emplearon el algoritmo BEB registraron un número de colisiones inferior a 1000, ocasionalmente alcanzaron un mejor desempeño usando el algoritmo RAG, pero en otros casos el mejor desempeño se registró utilizando el algoritmo BEB.
- El número de colisiones experimentadas por un nodo cuando usó el algoritmo BEB se relaciona directamente con la mejoría experimentada al usar el algoritmo RAG.

Teniendo en cuenta que la cantidad de colisiones detectadas por un nodo es un indicador de las condiciones de red, se puede afirmar que el uso del algoritmo RAG mejora el desempeño de los nodos de manera proporcional al nivel de congestión en la red. Esto se debe a que en condiciones de alta congestión el valor adecuado de ventana de contienda es alto; el algoritmo BEB parte de un valor Cw_{min} y duplica el valor de su ventana de contienda con cada colisión hasta alcanzar el valor adecuado. El algoritmo RAG por su parte alcanza rápidamente un valor adecuado de ventana de contienda puesto que lo fija a partir de una estimación de las condiciones de red y de contienda, disminuyendo con ello el número de colisiones.

Por lo anterior se puede afirmar que en cuanto desempeño frente a colisiones, el algoritmo RAG es superior al algoritmo BEB cuando enfrenta condiciones de alta congestión y que en situaciones de baja congestión, el desempeño de los algoritmos no difiere de manera determinante. Esto último debido a que en contextos de baja congestión, las colisiones de trama provienen en mayor medida de la aleatoriedad con que se calcula el tiempo de *Back-off*, calculo que ambos algoritmos realizan de igual forma.

El conteo total de tramas descartadas, presentado a continuación en la figura 3.23, es importante para evaluar el desempeño del algoritmo RAG, el cual incluye un mecanismo específicamente diseñado para evitar el descarte de tramas.

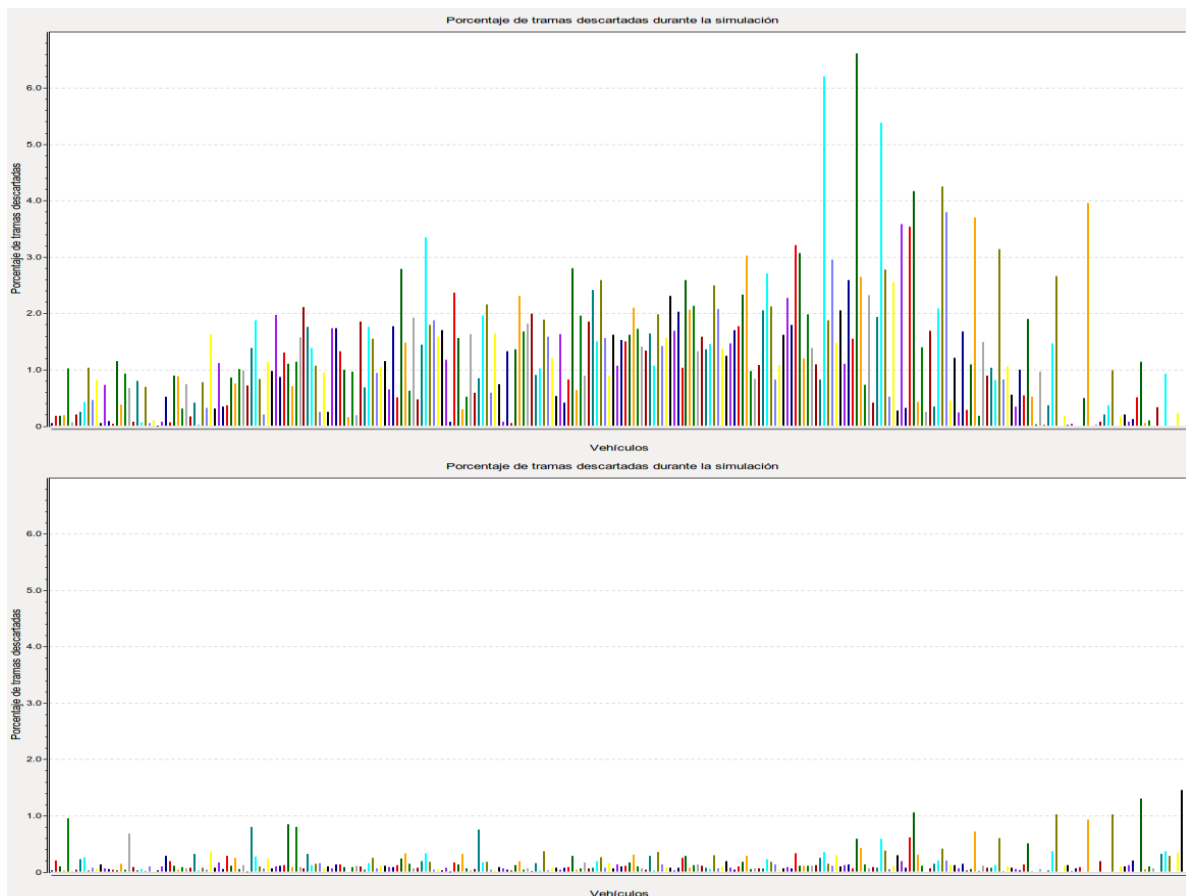


Figura 3.23 Porcentaje de tramas Descartadas, Escenario 2.

La cantidad de tramas descartadas se reduce drásticamente cuando los nodos usaron el algoritmo RAG para gobernar el proceso de contienda, como se observa en la figura 3.23. Se observan casos aislados en los que algunos nodos incrementan levemente dicho registro. Esto se debe a que el éxito o colisión de una trama tienen que ver con la probabilidad de que los contadores de *Back-off* de dos o más estaciones alcancen el valor cero de forma simultánea; así, el número de tramas descartadas es un registro afectado por la aleatoriedad con la que se calcula el tiempo de back-off. Pese a ello, es claro que la figura expresa una notable ventaja del algoritmo RAG.

La figura 3.23 además permite afirmar que el algoritmo RAG obtiene un desempeño superior al mostrado por el algoritmo BEB, esta superioridad se debe al cálculo de costo de colisiones sucesivas que hace parte de las condiciones de contienda consideradas por el algoritmo RAG.

El número promedio de intentos de transmisión se ilustra mediante la figura 3.24.

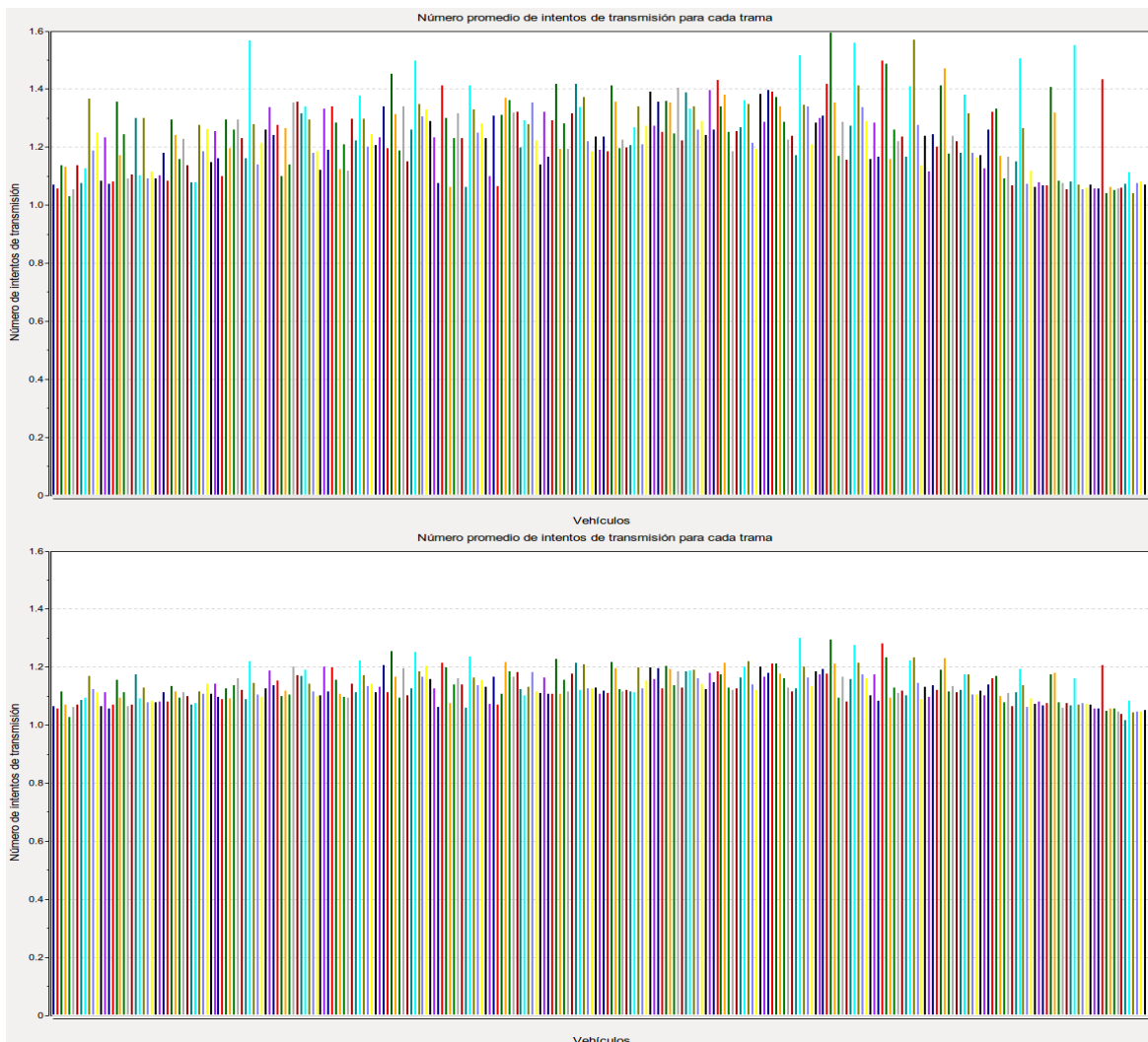


Figura 3.24 Número promedio de intentos para cada trama, Escenario 2.

Las dos gráficas mostradas en la figura 3.24 contienen cercanos valores a un intento, el cual es el valor más bajo posible. El algoritmo BEB no supera los 1.6 intentos de transmisión mientras que el algoritmo RAG alcanza valores de hasta 1.3 intentos de transmisión. Esto se explica ya que este dato es calculado incluyendo intervalos de tiempo en los cuales experimentan condiciones de red sumamente favorables para la transmisión, que impactan en el valor promedio total. Dicho esto, es claro que el algoritmo RAG registra una cantidad menor de intentos de transmisión necesarios, con lo cual es claro que dicho algoritmo reacciona a los fenómenos de colisión con mejor resultado que el algoritmo BEB.

El tiempo promedio que tardan las tramas en superar el proceso de contienda, calculado por los nodos al finalizar la simulación usando mediciones recogidas a lo largo de la misma, es mostrado en la figura 3.25.

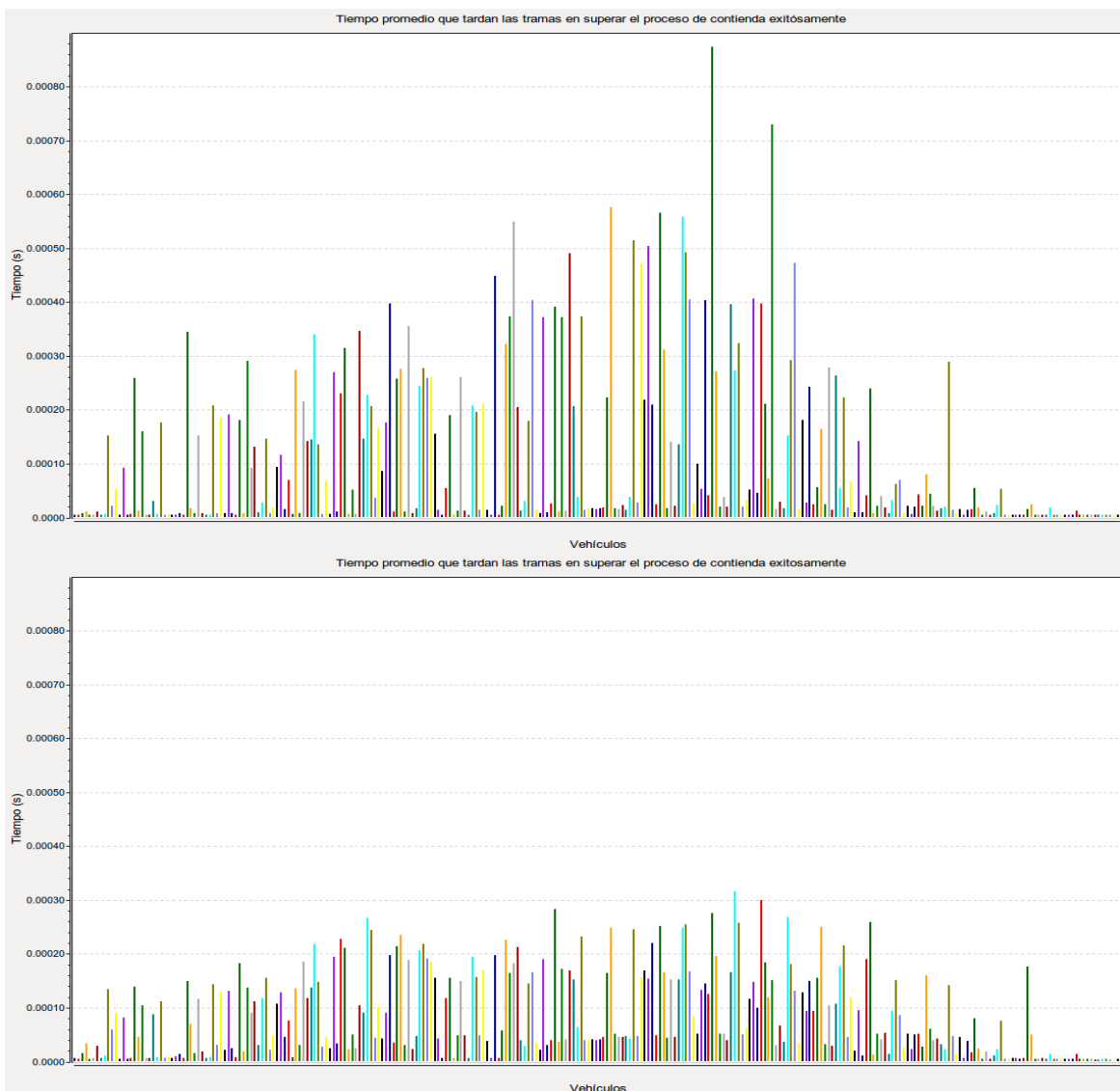


Figura 3.25 Tiempo promedio que tardan las tramas en superar el proceso de contienda, Escenario 2.

La comparación entre las dos gráficas que conforman la figura 3.25 parte de dos observaciones fundamentales:

- Cuando se considera a los nodos que presentan registros relativamente altos en la gráfica superior, al comparar con los registros mostrados por la gráfica correspondiente al algoritmo RAG, se observa que éste último obtiene un desempeño superior.
- Por otro lado, si se consideran los nodos que experimentaron registros relativamente bajos usando el algoritmo BEB y se compara su desempeño con el obtenido al usar el algoritmo RAG, se observa que el algoritmo BEB presenta resultados mejores para muchos de los nodos.

Teniendo en cuenta que los registros altos de este parámetro son causados por una alta congestión de red, la primera observación permite afirmar que el algoritmo RAG alcanza un desempeño superior al del algoritmo BEB en tales condiciones de alta congestión. A partir de la segunda observación se deduce que el algoritmo RAG y el BEB experimentan comportamientos de desempeño casi similares. Un análisis más detallado de este parámetro es pertinente y se realiza más adelante durante el análisis de los nodos 72 y 190.

Análisis Nodo 72

La figura 3.26 contiene las gráficas de ventana de contienda de los algoritmos considerados. Si bien la observación de este parámetro no permite obtener conclusiones acerca del desempeño del algoritmo, sí es útil para soportar las conclusiones generadas a partir de otros registros.

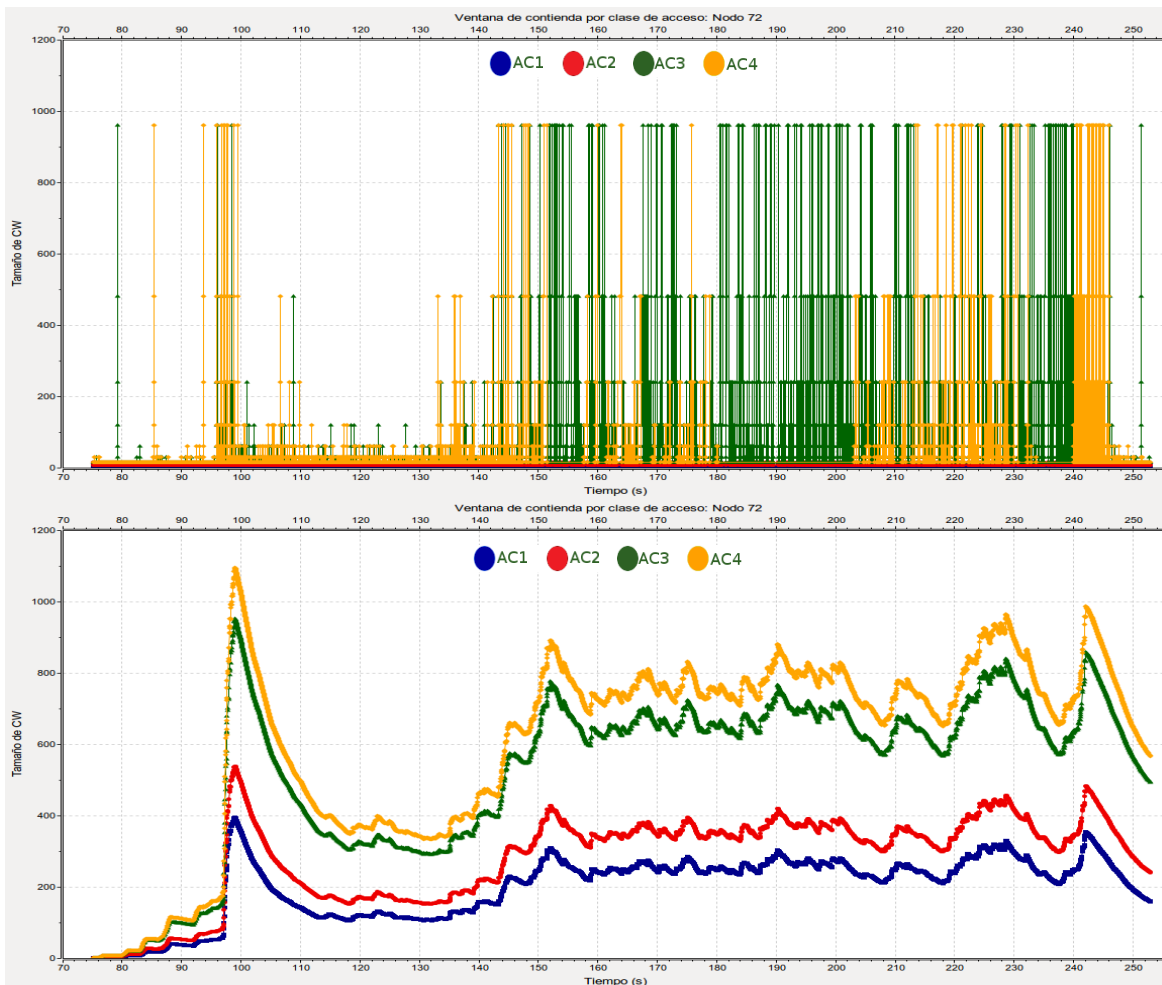


Figura 3.26 Ventana de Contienda por Clase de Acceso para el nodo 72, Escenario 2.

Dado que en el segundo escenario hay una mayor densidad de tramas transmitidas por segundo, el comportamiento de la ventana de contienda graficado en la figura 3.26 muestra cambios similares a los obtenidos en el escenario 1, los cuales son ahora más bruscos. Durante el periodo de tiempo de mayor congestión de red, que se encuentra entre el segundo 150 y el segundo 250, la ventana de contienda fijada por el algoritmo RAG es mayor que la fijada por el algoritmo BEB para las dos AC de mayor prioridad. Por el contrario, las dos colas de menor prioridad operan, usando el algoritmo RAG, con una ventana de contienda menor a los picos observados en la gráfica correspondiente al algoritmo BEB durante dicho periodo.

La cantidad de colisiones experimentadas por cada intento de transmisión, mostrada por las gráficas de la figura 3.27, es importante para determinar si los valores de ventana de contienda adoptados durante la simulación cumplen con el objetivo que corresponde: evitar que las tramas colisionen.

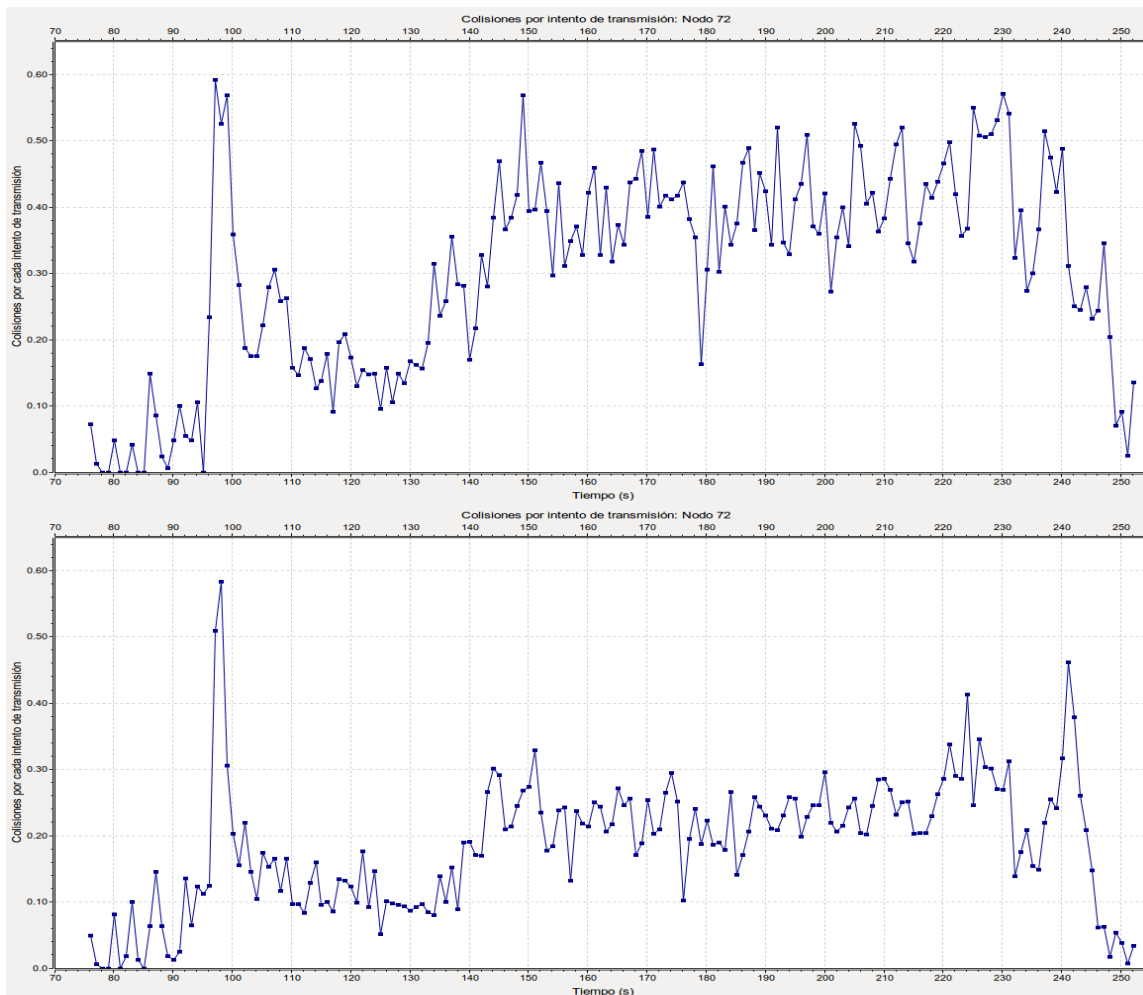


Figura 3.27 Colisiones por intento de Transmisión para el Nodo 72. Escenario 2.

La figura 3.27 muestra que el algoritmo RAG obtiene un mejor desempeño durante la mayor parte del periodo de tiempo graficado. El periodo comprendido entre el segundo 75 y el segundo 88 muestra un desempeño muy similar entre ambos algoritmos, siendo este el único periodo durante el cual el algoritmo RAG no muestra un desempeño notoriamente superior. Una vez más, se observa una superioridad más amplia por parte del algoritmo RAG cuando la congestión en el canal es alta.

El pico de colisiones registrado en el segundo 98 de la simulación se debe a un cambio brusco en el nivel de congestión de la red, este cambio se puede observar en la figura 3.5. El impacto que tiene sobre el registro de colisiones deja que ver que dichos cambios bruscos de congestión crean intervalos de tiempo críticos para el funcionamiento de la red.

A continuación se presentan las gráficas del *Throughput* registrado por el nodo 72 para cada algoritmo. Debido a que hacia el final de la simulación hubo mediciones de *Throughput* muy altas, se presenta este parámetro en 2 partes usando escalas distintas.

En la figura 3.28 se muestra el primer intervalo de tiempo, comprendido entre el segundo 70 y el segundo 240 de simulación.



Figura 3.28 *Throughput* expresado en ACKs por segundo para cada AC primera parte, Nodo 72. Escenario 2.

El intervalo restante, comprendido entre el segundo 240 y el segundo 252.2 es mostrado en la figura 3.29.

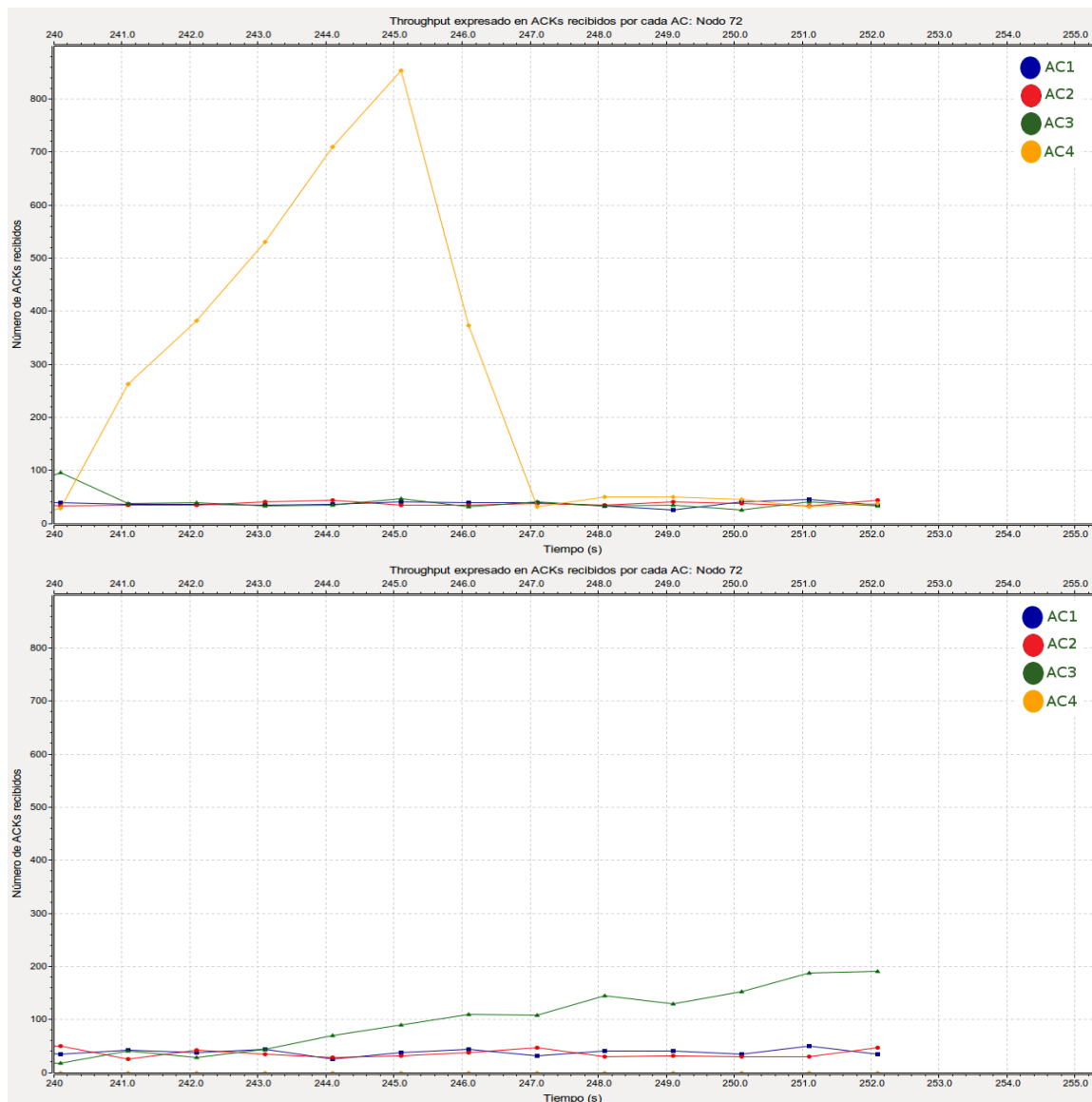


Figura 3.29 *Throughput* expresado en ACK por segundo medidos por cada AC segunda parte, Nodo 72, Escenario 2..

El comportamiento de la gráfica de *Throughput* mostrada en la figuras 3.28 y 3.29, deja ver comportamientos distintos para cada algoritmo. Como se observa, el *Throughput* oscila alrededor de 40 ACK por segundo. Alrededor del segundo 110 se observa, en el caso del algoritmo RAG que las colas 3 y 4 experimentan un descenso de *Throughput* pronunciado. La cola 4 llega a un *Throughput* de cero. Seguidamente, debido a que durante dicho periodo estas colas experimentan una acumulación de tramas, se observa un *Throughput* elevado para la cola 3 durante el periodo que va desde el segundo 105 hasta el segundo 110, cuando regresa al

comportamiento normal. Una vez que esto ocurre, la cola 4 expresa un *Throughput* elevado a través del cual se libera de las tramas acumuladas. Esta serie de sucesos no están presentes en el algoritmo BEB donde sólo se observa alrededor del segundo 100 un pico de bajo *Throughput* experimentado por la cola 1 que desciende hasta un valor de 22 ACKs. Esto quiere decir que para el algoritmo RAG, las colas 3 y 4 tuvieron menos posibilidades de ganar una contienda interna durante este periodo de tiempo, con lo cual el *Throughput* de las colas 1 y 2 permaneció en su comportamiento normal. Esto constituye una diferencia importante con el algoritmo BEB, en el cual es la cola de mayor prioridad registra el pico más bajo.

A partir del segundo 150 y hasta el segundo 240, cuando la congestión es elevada, se observa que, para el algoritmo RAG, las colas 3 y 4 reciben el impacto, experimentando un descenso sostenido de *Throughput* mientras que las colas 1 y 2 no experimentan un impacto notable, toda vez que sus lecturas de *Throughput* continúan oscilando alrededor de 40 ACKs. Por su parte, durante dicho periodo el *Throughput* obtenido por el algoritmo BEB muestra que las colas 3 y 4 se ven afectada de manera menos crítica que sus pares en el algoritmo RAG, con lo cual las colas 1 y 2 reciben un impacto mayor, experimentando oscilaciones bruscas de *Throughput* y experimentando descensos pronunciados.

A partir de lo anterior se puede afirmar que en términos de *Throughput*, en el algoritmo RAG las colas que se ven afectadas por las condiciones de alta congestión de la red son las colas 3 y 4 de baja prioridad, marcando una diferencia con el algoritmo BEB, en el cual todas las colas se ven afectadas.

Teniendo en cuenta que, en general, se puede afirmar que es deseable que el impacto en términos de *Throughput* sea diferenciado de acuerdo con el nivel de prioridad de las colas, se deduce que el desempeño mostrado por el algoritmo RAG es superior al del algoritmo BEB.

El registro acumulativo de tramas descartadas es presentado en la figura 3.30. La gráfica superior, correspondiente al algoritmo BEB es mostrada con una escala 10 veces más grande en el eje vertical que la de la gráfica inferior, correspondiente al algoritmo RAG.

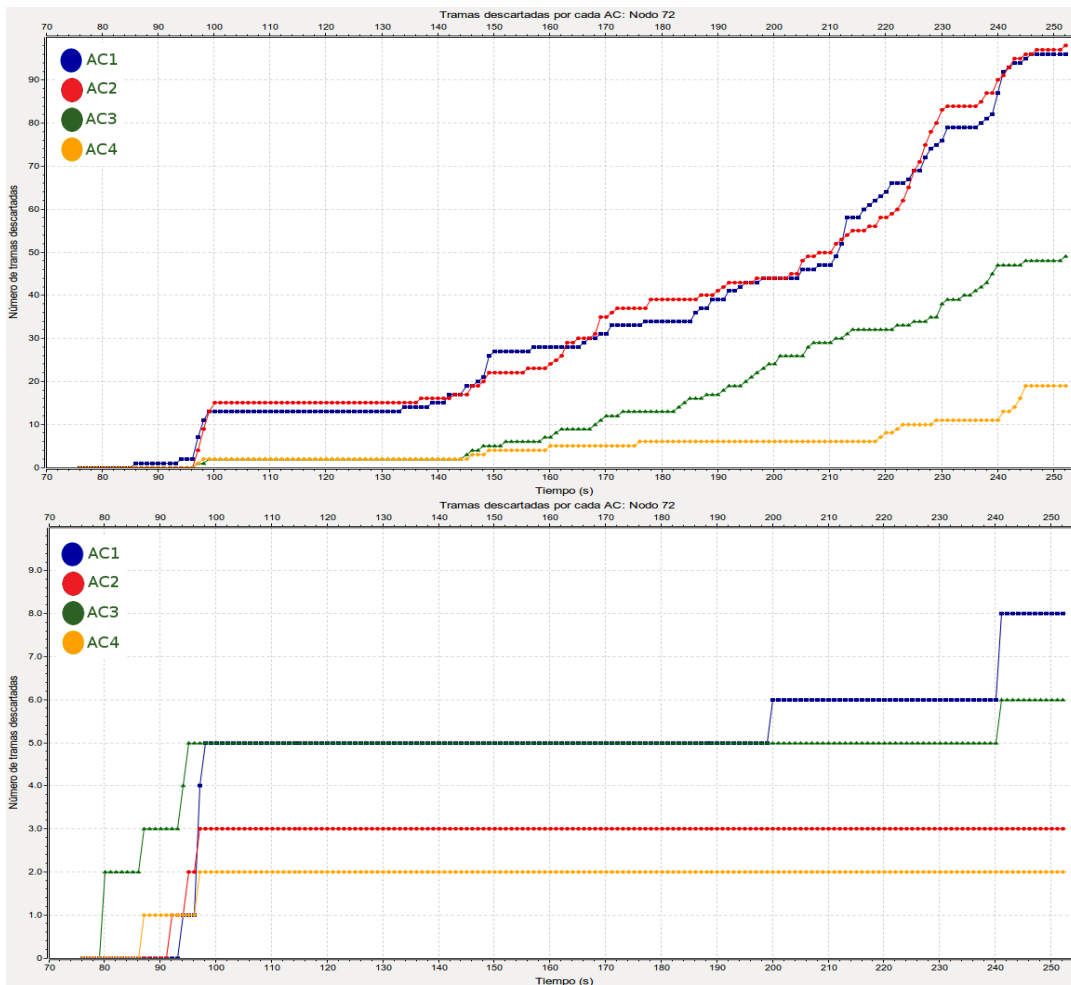


Figura 3.30 Tramas descartadas por cada AC, Nodo 72, Escenario 2.

La cantidad de tramas descartadas por el algoritmo RAG es, como muestra la figura 3.30, mucho menor que la de el algoritmo BEB. En ambas figuras la cola uno experimenta el mayor número de colisiones. Este hecho se explica, ya que el algoritmo BEB fija valores máximos de ventana de contienda para las AC, impidiendo que estas eleven su CW hasta un valor adecuado.

Comparativamente se puede afirmar que para el nodo 72 el algoritmo RAG obtuvo un desempeño mucho mejor puesto que el número de tramas descartadas se reduce ostensiblemente.

Acerca de la gráfica correspondiente al algoritmo RAG, se debe anotar que se descartaron muchas de las tramas alrededor del segundo 98, momento en el cual este nodo experimenta un brusco cambio en las condiciones de congestión de red. A partir de este hecho se puede deducir que si bien el algoritmo RAG ha demostrado acomodarse al estado de la red, sufre un impacto en su desempeño cuando registra cambios bruscos de congestión.

La figura 3.31 muestra el número promedio de intentos de transmisión necesarios para una transmisión exitosa registrados segundo a segundo por los nodos.

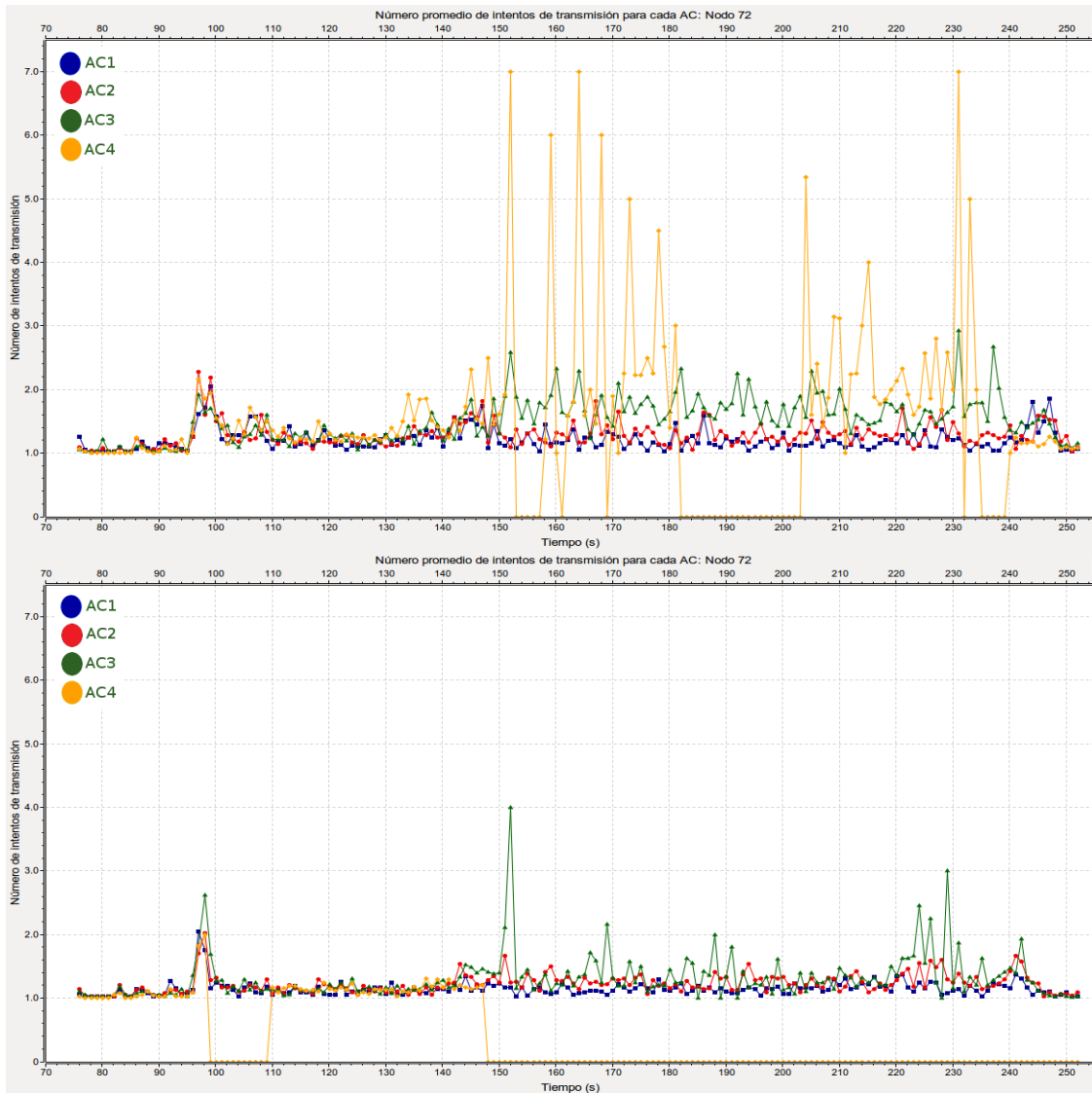


Figura 3.31 Número de Intentos de Transmisión por cada AC, Nodo 72, Escenario 2.

En la gráfica superior correspondiente al algoritmo BEB, se observó que en el periodo de tiempo comprendido entre el segundo 148 y el segundo 182 en el cual la cola cuatro experimenta 6 picos de entre 4.5 y 7 intentos de transmisión y en 4 ocasiones adopta un valor cero, el cual denota que esa cola no consiguió completar ninguna transmisión exitosa en el segundo correspondiente. Un comportamiento similar se observa en el intervalo de tiempo comprendido entre el segundo 204 y el segundo 240 de simulación. El algoritmo RAG por su parte registra en estos intervalos algunos picos de altura relativa media para la cola tres y un valor cero para la cola cuatro, que no consigue realiza una sola transmisión exitosa desde el segundo 148 en adelante. Sin embargo se observa que las colas uno y dos muestran un desempeño más estable en la gráfica correspondiente al algoritmo RAG que en la de su contraparte, lo cual deja ver que en el algoritmo RAG, las condiciones de red adversas son

asumidas por las colas de baja prioridad, mientras que las colas de alta prioridad reciben poco impacto en su desempeño.

Sumándose al análisis relativo al *Throughput*, estas observaciones permiten afirmar que el algoritmo RAG distribuye mejor el impacto generado por las condiciones de red, manteniendo un desempeño estable para las colas de alta prioridad mientras las colas de baja prioridad ven su desempeño afectado.

El tiempo promedio necesario para que las tramas de las colas uno y dos superen el proceso de contienda exitosamente usando cada algoritmo es mostrado en la figura 3.32.

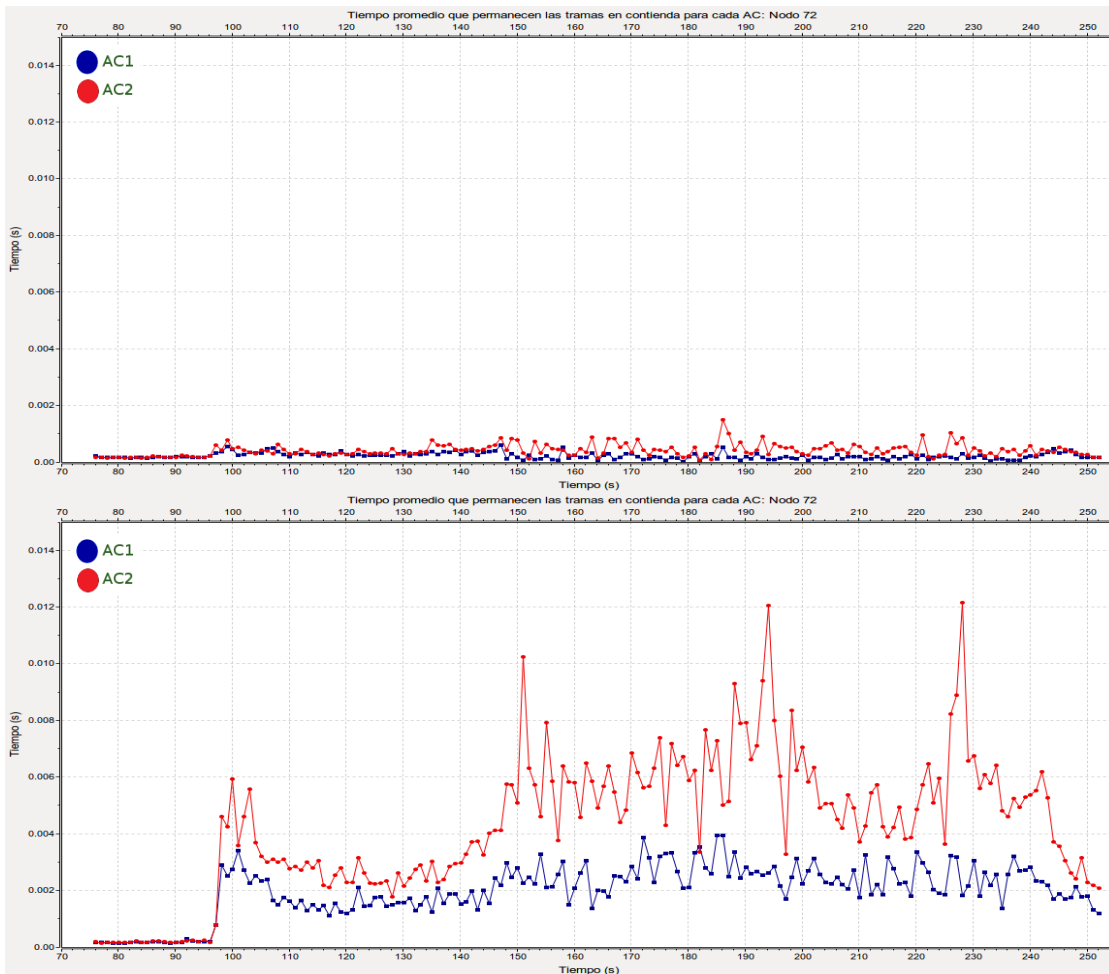


Figura 3.32 Tiempo Promedio que permanecen las tramas en contienda colas 1 y 2, Nodo 72, Escenario 2.

Cuando el nodo 70 usó el algoritmo RAG las tramas de las colas uno y dos tardaron una mayor cantidad de tiempo en superar el proceso de contienda, como deja ver la figura 3.32. Esto se debe a que el algoritmo BEB accede al medio de manera agresiva, llevando la ventana de contienda a su valor mínimo al iniciar el intento de transmitir una nueva trama, con lo cual sufre

una alta probabilidad de colisión y descarte de trama, pero también registra un tiempo más corto de contienda para las tramas exitosamente transmitidas.

El tiempo promedio que requieren las tramas de las colas tres y cuatro para superar el proceso de contienda usando cada algoritmo es mostrado en la figura 3.33.

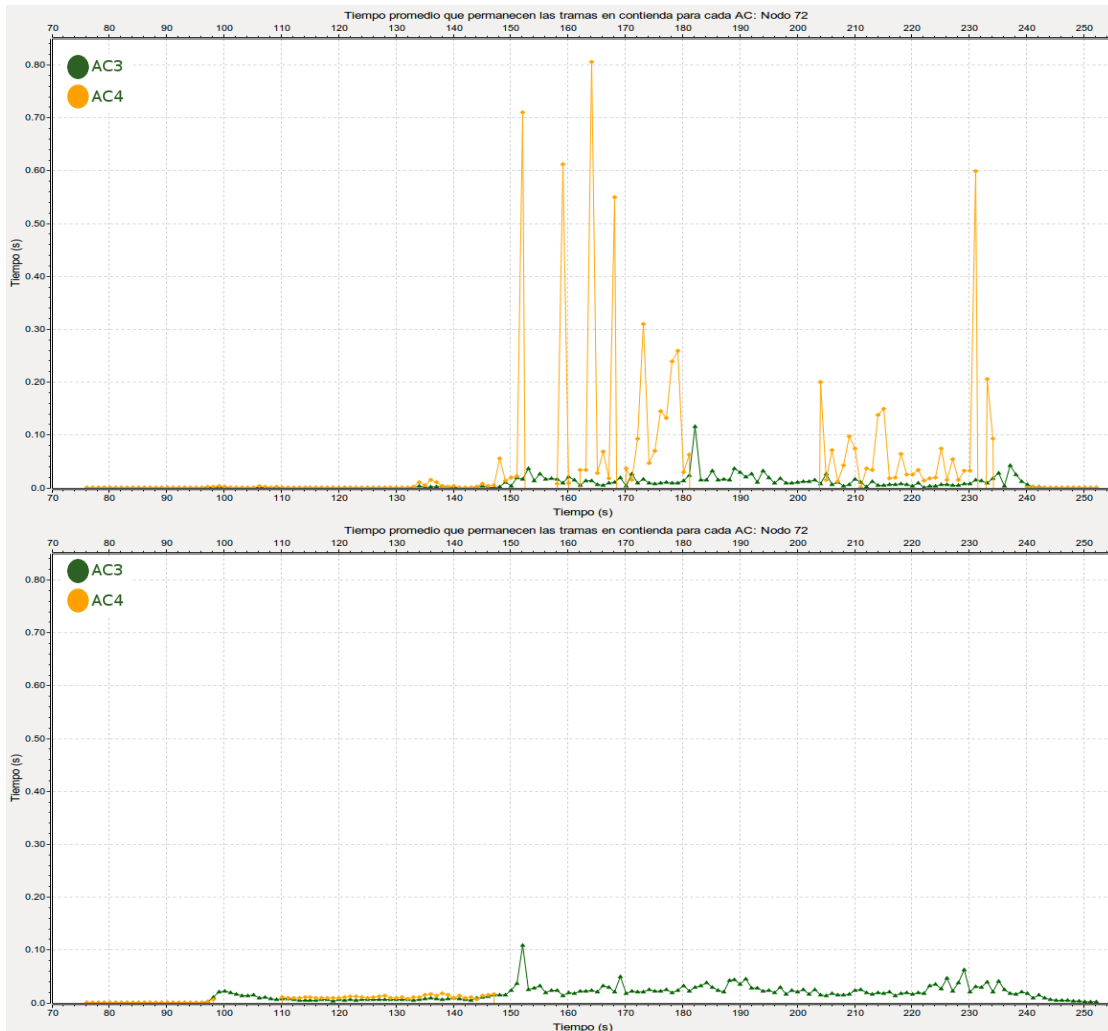


Figura 3.33 Tiempo promedio que permanecen las tramas en Contienda colas 3 y 4, Nodo 72, Escenario 2.

La curva verde correspondiente a la cola tres, muestra que sus tramas experimentaron tiempos de contienda similares usando el algoritmo RAG y el algoritmo BEB. La curva amarilla, correspondiente a la cola cuatro expresa que dicha cola sufrió picos de altura relativamente alta y periodos durante los cuales no registró transmisiones exitosas durante el intervalo de tiempo que va desde el segundo 150 hasta el segundo 240 de simulación. En coherencia con lo observado en la figura 3.33, el número de intentos de transmisión durante dicho intervalo de tiempo cuando se usó el algoritmo RAG la cola cuatro no registró ninguna transmisión exitosa. En suma, se observa que las colas uno, dos y cuatro registran un desempeño mejor usando el algoritmo BEB y la cola tres registra un desempeño similar al alcanzado usando el algoritmo

RAG. Se debe notar sin embargo que los altos tiempo alcanzados por la cola 4 usando el algoritmo BEB pueden causar alta latencia para las tramas de alta prioridad puesto que durante el tiempo que permanecen en contienda impiden que las colas de mayor prioridad transmitan. Dichos tiempos altos se deben a que el algoritmo BEB asigna valores máximos de ventana de contienda demasiado apartados entre la cola 1 y la cola 4, causando que, de ganar la cola 4 de uno de los nodos una contienda interna, se encuentre compitiendo con nodos que transmiten tramas de alta prioridad y por tanto acceden al medio con parámetros de contienda mucho mejores. En tal escenario la desventaja del nodo que transmite una trama de cola 4 es tal que su contador de back-off tarda demasiado tiempo en llegar a cero.

Esto es determinante para entender por qué, a pesar de que el algoritmo BEB registra mejor desempeño en todas las colas para este nodo, la figura 3.25 que muestra los tiempos promedio totales deja ver un mejor desempeño para el algoritmo RAG; los altos tiempos de la cola cuatro son los responsables de elevar el promedio total del nodo.

Un análisis en términos de latencia no se adelanta debido a que el presente trabajo centra su atención en el proceso de contienda. Para medir el desempeño del algoritmo RAG en términos de latencia se debe realizar un estudio desde el punto de vista de uno o varios servicios específicos desplegados sobre la red VANET.

Análisis Nodo 190.

La figura 3.34 muestra el tamaño de la ventana de contienda adoptado por las colas del nodo 190 para el caso de alta densidad de tramas de datos usando cada algoritmo. Cada vez que los algoritmos cambiaron el tamaño de su ventana de contienda, dicho cambio fue registrado en las gráficas correspondientes.

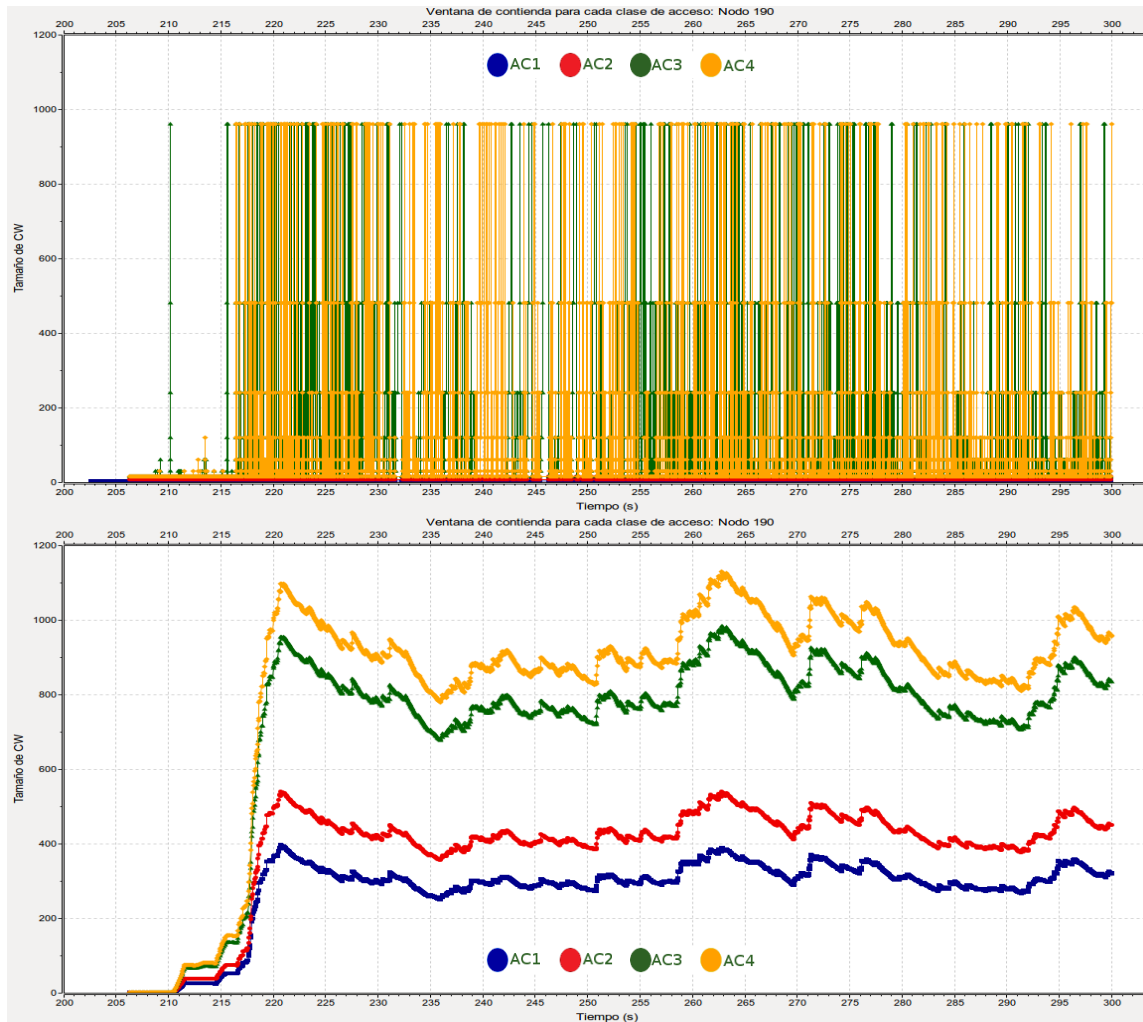


Figura 3.34 Ventana de Contienda para cada AC, Nodo 190, Escenario 2.

La gráfica de ventana de contienda del algoritmo BEB para el vehículo 190 muestra una gran cantidad de picos de máximo valor, con lo cual es claro que este vehículo experimenta condiciones de alta congestión desde el segundo 220 y hasta el fin de su recorrido. Por su parte, la gráfica correspondiente al algoritmo RAG permite observar que la cola cuatro alcanza en algunos casos, picos con valores superiores de ventana de contienda a aquellos alcanzados por el algoritmo BEB. La cola tres que opera según el algoritmo RAG permanece con valores algo inferiores a los picos alcanzados por su contraparte que opera con el algoritmo BEB. Las colas uno y dos que operan con el algoritmo RAG alcanzan valores mayores a aquellos alcanzados por sus contrapartes operando con el algoritmo BEB. Los valores de ventana de

contienda para ambos algoritmos muestran una diferenciación relativa al nivel de prioridad de la cola. La diferenciación entre la colas 3 y 4 y la colas 1 y 2 es más amplia en el algoritmo BEB que en el algoritmo RAG, con lo cual en este último una trama de baja prioridad tiene más posibilidades de ser transmitida cuando compite con tramas de mayor prioridad.

La cantidad de colisiones registradas por el nodo por cada intento de transmisión es registrada segundo a segundo en las gráficas de la figura 3.35, muestra que en cuanto a colisiones experimentadas por intento de transmisión, el algoritmo BEB supera el desempeño del algoritmo RAG en la medición correspondiente al segundo 210. Durante el resto del periodo graficado, el algoritmo RAG obtiene resultados claramente superiores. Se observa que el pico más alto de colisiones se obtiene, para ambos algoritmos, en el segundo 218. El algoritmo BEB alcanza en dicho instante un pico de 0.82 CpTx mientras que su contraparte operando con el algoritmo RAG alcanza un pico de 0.54 CpTx. Esto permite afirmar que la ventana de contienda usada por el algoritmo RAG redujo el número de colisiones exitosamente, cumpliendo con el propósito con el que fue diseñado. En este punto se debe señalar que ya que el presente trabajo se ocupa de obtener conclusiones generales acerca del funcionamiento del algoritmo RAG a través de la comparación de resultados, no dispone de un análisis de equilibrio con el cual determinar una relación numérica entre los parámetros de diseño definidos y el mejoramiento en términos de CpTx.

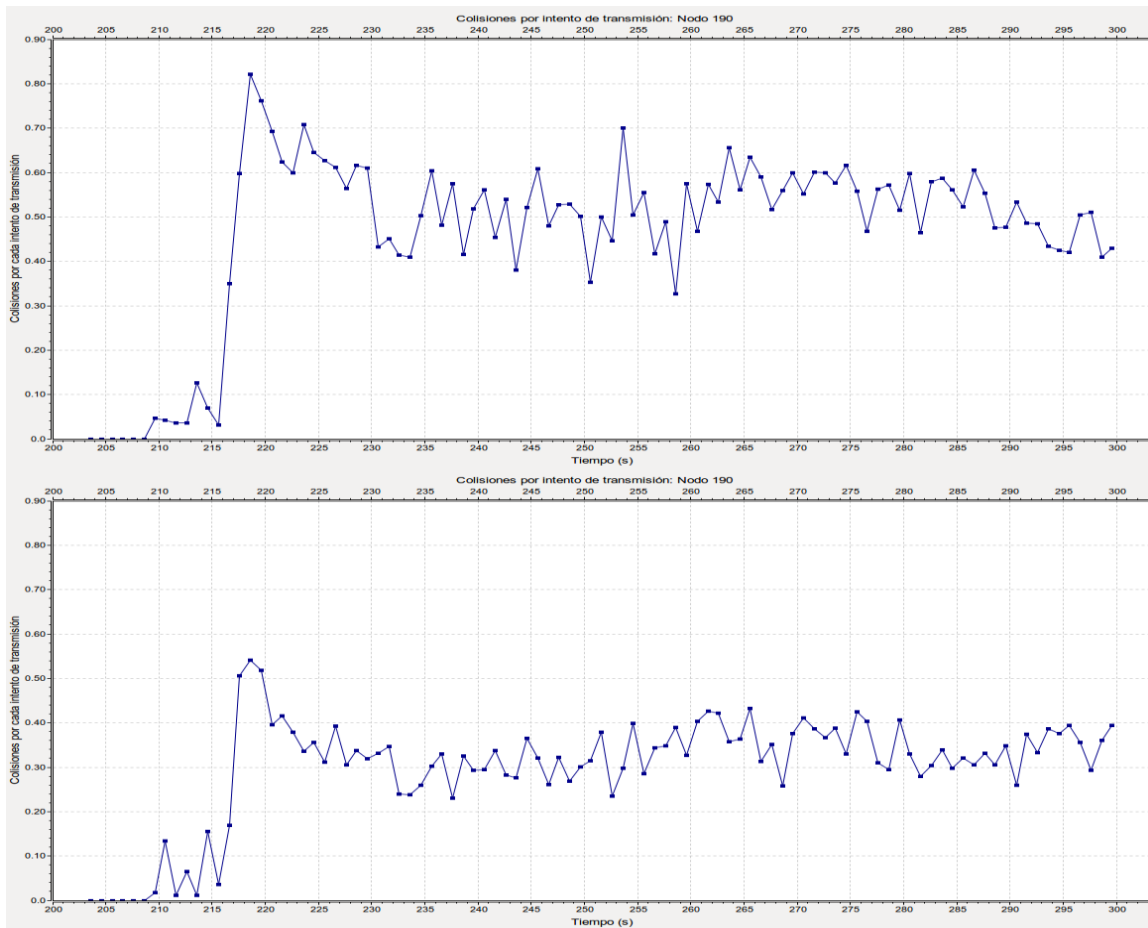


Figura 3.35 Colisiones por Intento de Transmisión, Nodo 190, Escenario 2. Por los Autores.

La gráfica de *Throughput* por cada AC mostrada en la figura 3.36 deja ver que durante el periodo de alta congestión experimentado por el vehículo 190, esto es, desde el segundo 218 en adelante, el impacto es asumido de manera diferente. En el caso del algoritmo RAG, son las colas tres y cuatro quienes ven su *Throughput* afectado por la congestión del canal. En el caso del algoritmo BEB, el impacto se distribuye de manera menos diferenciada entre las colas; las colas tres y cuatro asumen en menor medida las condiciones de congestión de red, con lo cual parte del impacto alcanza a las colas uno y dos. El pico alto de la cola cuatro registrado en el segundo 259 de simulación tiene que ver con el bajo *Throughput* experimentado por dicha cola en los segundos previos, con lo cual, una vez que las condiciones de la red lo permitieron, dicha cola realizó sucesivas transmisiones de las tramas acumuladas. Esto quiere decir que el algoritmo RAG distribuye el acceso al medio de transmisión de forma más coherente con los niveles de prioridad de las tramas. Se debe señalar que durante el diseño del algoritmo RAG no se incorporó ningún elemento dirigido a mejorar el desempeño de los nodos en este sentido. Teniendo en cuenta que la oscilación de la ventana de contienda, propia del algoritmo BEB, causa que tras una colisión exitosa un nodo compita por el medio con mejores parámetros de contienda durante un corto periodo de tiempo, se deduce que la inferioridad del algoritmo BEB en este parámetro proviene del efecto de conjunto de este fenómeno de injusticia a corto plazo

Por otro lado, las gráficas de la figura 3.36 referentes a los dos algoritmos de análisis expresan lo siguiente:

- Algoritmo BEB: Las condiciones de congestión de la red causan que todas las colas vean afectado su *Throughput* en forma de oscilaciones bruscas del mismo. La cola de menor prioridad denotada con amarillo es la más afectada.
- Algoritmo RAG: En las mismas condiciones de red, el algoritmo RAG preserva el *Throughput* de las colas de alta prioridad, con lo cual la cola 3 *Throughput* reducido y la cola 4 no consigue transmitir tramas.

De modo general se puede afirmar que el algoritmo RAG consigue un desempeño mejor puesto que trata a las tramas de acuerdo con su nivel de prioridad. Sin embargo a partir de un estudio enfocado en servicios específicos, se pueden desarrollar consideraciones e incorporar elementos de diseño para evitar que las colas de baja prioridad vean su *Throughput* totalmente anulado.

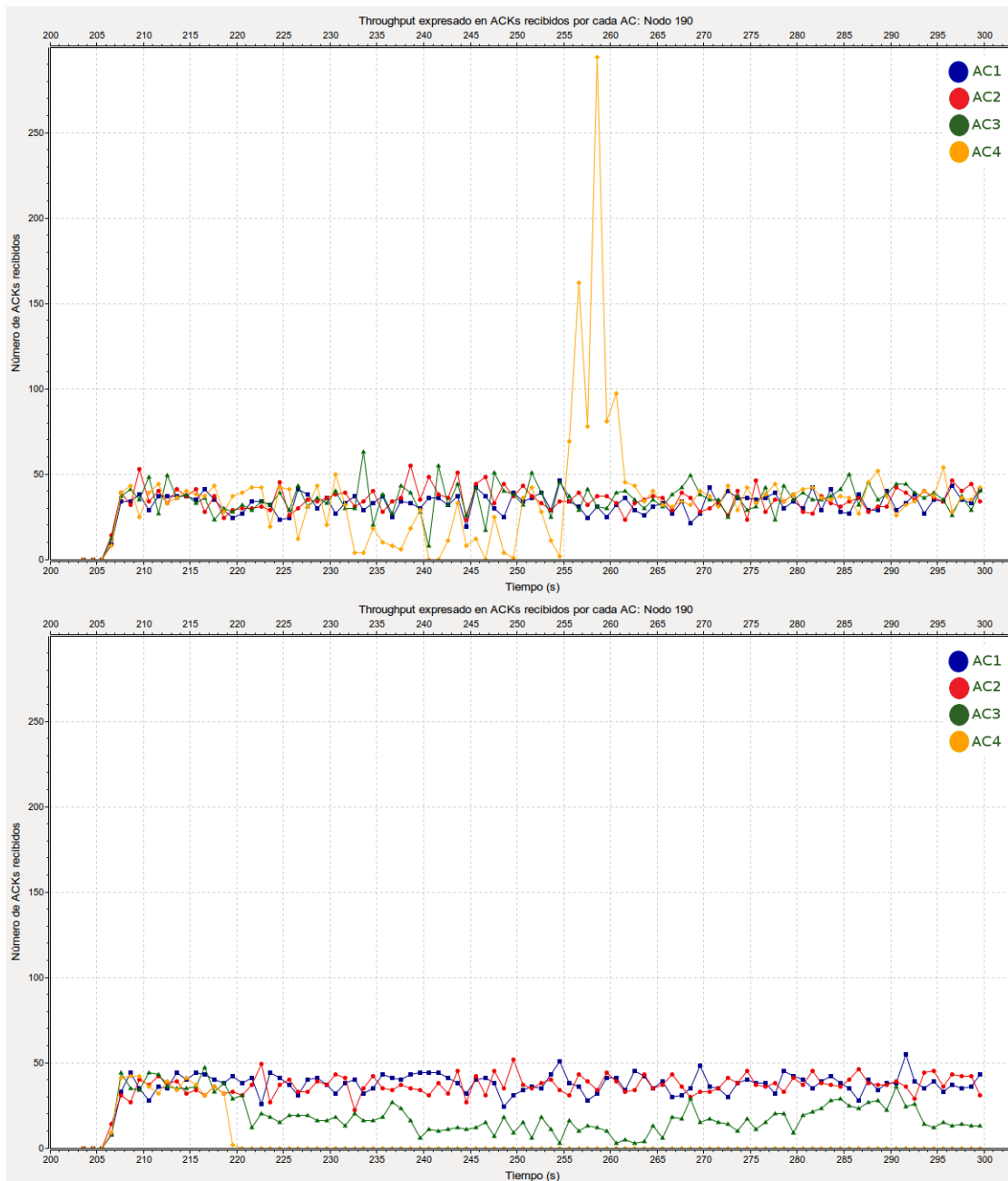


Figura 3.36 *Throughput* expresado en ACKs por segundo para cada AC, Nodo 190, Escenario 2.

La cantidad de tramas descartadas por el nodo 190 durante la simulación es graficado acumulativamente para cada algoritmo en la figura 3.37. El eje vertical de la gráfica inferior, correspondiente al algoritmo RAG, usa una escala 10 veces más pequeña que la usada en la gráfica superior, correspondiente al algoritmo BEB.

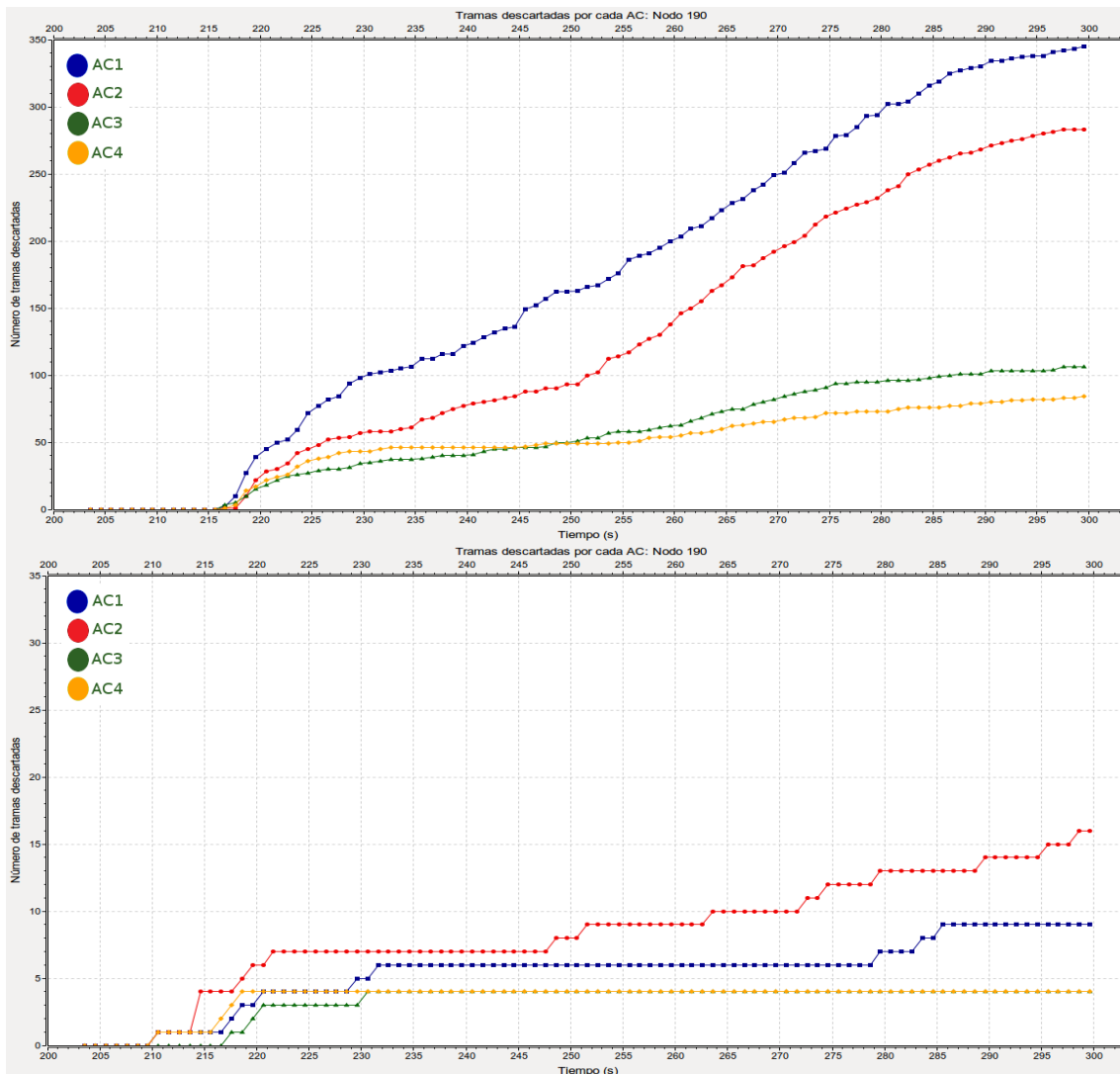


Figura 3.37 Tramas descartadas por cada AC, Nodo 190, Escenario 2.

El desempeño de los nodos en términos de tramas descartadas muestra una superioridad notable por parte del algoritmo RAG. Cuando se usa el algoritmo RAG las colas dos y uno (en ese orden) experimentan un mayor número de tramas descartadas que las colas tres y cuatro. Sin embargo el número de tramas descartadas es tan reducido que este hecho se encuentra en el rango de lo esperado. Una vez más, cuando se usó el algoritmo BEB se observa que las colas de mayor prioridad experimentan la mayor cantidad de tramas descartadas. El algoritmo RAG experimenta la mayor cantidad de tramas descartadas alrededor del segundo 220, dejando ver una vez más que los cambios bruscos en el nivel de congestión son intervalos de tiempo críticos para el algoritmo RAG.

El número promedio de intentos de transmisión que necesitaron las tramas del nodo 190 para superar la contienda es mostrado en la figura 3.38.



Figura 3.38 Número promedio de Intentos de transmisión, Nodo 190, Escenario 2.

El desempeño de las colas en términos de intentos de transmisión que se evidencia en la figura 3.38, expresa una superioridad notable del desempeño obtenido por las colas 1, 2 y 3 usando el algoritmo RAG. Como se mencionó antes, la cola 4 no consigue realizar transmisiones a partir del segundo 120 y, por lo tanto, no se puede comparar su desempeño en términos de intentos de transmisión. Las gráficas muestran un pico alrededor del segundo 220, momento en el que se produce un brusco incremento en el nivel de congestión. En términos de intentos de transmisión ambos son afectados por dicho cambio brusco. El algoritmo BEB sufre un impacto más fuerte debido a que continúa retornando a un valor mínimo de ventana de contienda mientras las condiciones se hacen cada vez más adversas.

Por lo anterior, el algoritmo RAG reduce el número de intentos de transmisión necesarios para transmitir una trama. Esto es una consecuencia directa de la reducción del número de colisiones pero también del mecanismo implementado para evitar descarte de tramas, con lo cual se puede afirmar que el diseño del algoritmo RAG brinda los resultados deseados. Sin

embargo, se debe notar que es pertinente sumar al análisis de desempeño realizado en el presente trabajo un análisis de equilibrio que permita obtener una relación numérica entre los parámetros del algoritmo y la reducción de intentos de transmisión necesarios.

El tiempo promedio que tardaron las tramas de las colas uno y dos del nodo 190 en superar el proceso de contienda usando cada algoritmo es mostrado en la figura 3.39



Figura 3.39 Tiempo promedio que permanecen las tramas en contienda colas 1 y 2, Nodo 190, Escenario 2.

Coherentemente con lo observado en el nodo 70 de este escenario de simulación, las colas uno y dos registran, al usar el algoritmo BEB, un desempeño ampliamente superior en términos de tiempo necesario para superar la contienda.

Los registros de tiempo necesario para superar la contienda de las colas restantes del nodo 190 se muestra en la figura 3.40.



Figura 3.40 Tiempo Promedio que permanecen las tramas en contienda para las colas 3 y 4, Nodo 190, Escenario 2.

A partir del segundo 220 de la gráfica inferior en la figura 3.40, correspondiente al algoritmo RAG, la cola cuatro no registra transmisiones exitosas. La cola tres usando el algoritmo BEB muestra un mejor desempeño de manera consistente durante toda la simulación, con la sola excepción del pico registrado en el segundo 240 de simulación. Tal como se observó en el nodo 72 de este escenario, la cola cuatro registra picos altos de tiempo en contienda que contribuyen en gran medida a elevar las mediciones totales de este parámetro registradas en la figura 3.25. El pico registrado por la cola 4 en la gráfica correspondiente al algoritmo BEB es de 0.45 segundos, tiempo durante el cual las demás colas de este nodo no transmitirán tramas. Como se mencionó antes, a partir de un análisis de servicios se debe determinar si es preferible que la cola 4 no transmita en absoluto permitiendo un mejor desempeño de las colas de mayor prioridad.

En resumen, a partir de los análisis desarrollados acerca de los resultados obtenidos y presentados en las gráficas de este capítulo, se puede afirmar que el algoritmo RAG mejora el desempeño de la red VANET en términos de colisiones, tiempo promedio de contienda y tramas descartadas gracias a los elementos de diseño incorporados partir del análisis basado en Teoría de Juegos. Como consecuencia de esa mejora de desempeño se registra también una mejora en el número promedio de intentos necesarios para una transmisión exitosa.

El análisis deja ver también problemas en el comportamiento del algoritmo BEB, que a pesar de incorporar parámetros orientados a garantizar un trato diferenciado de las tramas en coherencia con su nivel de prioridad, no lo consigue. El algoritmo RAG por su parte muestra un desempeño coherente con los niveles de prioridad de las colas, sin embargo, por causa de esto, las colas de baja prioridad pueden, en condiciones de alta congestión, perder toda oportunidad de transmitir. Esto debe ser objeto de análisis en el marco de una investigación posterior.

4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A partir del trabajo realizado y documentado en el presente texto, se obtienen conclusiones relacionadas con el desempeño del algoritmo RAG construido usando la Teoría de Juegos basado en el estudio del modelo Juego de Acceso Aleatorio (*Random Access Game*). Las diferentes etapas que hicieron parte del proceso y los varios elementos técnicos y teóricos involucrados permiten, además, obtener conclusiones acerca de dichas etapas y dichos elementos.

Adicionalmente se brindan ciertas recomendaciones relacionadas con la metodología y trabajos futuros en el área de las telecomunicaciones y las matemáticas, necesarios para alcanzar una comprensión profunda acerca de la relación entre la Teoría de Juegos y las telecomunicaciones

4.1. CONCLUSIONES

- OMNET++, SUMO y VeINS ofrecen la posibilidad de la implementación de un entorno de simulación VANET y de un estudio personalizado del funcionamiento de este tipo de redes mediante la edición del código abierto de este tipo de herramientas software.
- La Teoría de Juegos aporta valiosas herramientas analíticas para ser usadas en la creación de un algoritmo de acceso. Los conceptos de utilidad, costo, castigo e incentivo, empleados durante el trabajo de grado, permiten abstraer características de operación de los métodos de acceso en las redes de telecomunicaciones.
- El algoritmo RAG obtuvo un mejor desempeño en términos de colisiones, tramas descartadas, intentos de transmisión y tiempo necesario para que las tramas superen el proceso de contienda. Dicha superioridad se constató en las gráficas que recogen datos globales de cada simulación.
- Como se evidenció en el análisis de los vehículos considerados, la amplitud de la superioridad de desempeño del algoritmo RAG se relaciona directamente con el nivel de congestión de la red.
- El algoritmo RAG presenta un comportamiento estable en términos de ventana de contienda, que permite enfrentar condiciones de alta congestión Vehicular, con la incursión en un decremento en el número de tramas descartadas. Aunque la variación gradual de la ventana de contienda dada por el Juego Gradiente no responde con la suficiente rapidez a cambios bruscos de congestión vehicular, lo que puede originar pérdida de tramas cuando ocurren dichos cambios.

- El algoritmo RAG sitúa la ventana de contienda en valores estables, con lo cual consigue transmisiones exitosas usando valores de ventana de contienda mejores que el algoritmo BEB.
- A partir del análisis de *Throughput*, se concluye que la asignación de valores de CW del algoritmo RAG es más adecuada para las comunicaciones en VANET. Contribuye a garantizar una distribución justa del acceso al medio.
- El algoritmo RAG reduce el número de colisiones experimentadas por los nodos. Esta reducción es más notable en condiciones de alta congestión de la red. Este hecho es de mayor importancia justamente para condiciones de alta congestión puesto que si se eleva el número de colisiones experimentadas por los nodos, estos generan retransmisiones de trama y con ello mayor congestión.
- Cuando la red presenta condiciones de alta congestión que hacen difícil conseguir transmisiones exitosas, el impacto en términos de *Throughput* es recibido principalmente por las colas de baja prioridad. Con ello, el algoritmo garantiza que las tramas de alta prioridad no sean superadas en contienda por tramas de menor prioridad.
- Cuando una trama colisiona sucesivamente, el algoritmo RAG reacciona exitosamente para evitar que la trama alcance el número máximo de retransmisiones. Esto tiene que ver directamente con el parámetro **tasa de pérdidas** asociado a la calidad de servicio.
- El algoritmo RAG realiza en promedio un menor número de retransmisiones antes de alcanzar una transmisión exitosa y con ello, genera menor carga de tráfico sobre la red.
- Cuando las condiciones de red se hacen desfavorables para la transmisión, el algoritmo RAG distribuye el acceso al medio de acuerdo con el nivel de prioridad. El impacto en el desempeño de las AC es asumido por las colas de baja prioridad, las cuales pueden llegar a dejar de transmitir si las condiciones de red son suficientemente adversas.
- Al usar el algoritmo RAG las tramas de las colas de alta prioridad tardan más tiempo en superar el proceso de contienda. Sin embargo, debido a que el algoritmo BEB genera tiempos en contienda muy altos para las tramas de baja prioridad, el tiempo promedio que tardan las tramas de un nodo en superar el proceso de contienda es menor usando el algoritmo RAG.
- El algoritmo RAG, diseñado usando la Teoría de Juegos, es exitoso puesto que obtiene mejores resultados que el algoritmo BEB en todos los parámetros tomados en cuenta para su análisis durante el presente trabajo de grado.

4.2. RECOMENDACIONES

- Para monitorear en detalle el funcionamiento de la red y detectar fallas de operación, es útil recurrir a la funcionalidad de graficar parámetros en el tiempo de OMNET++. En numerosos casos resulta más informativa que la consola de simulación pues permite comparar las coyunturas descritas por las gráficas de manera explícita y clara.

- Antes de iniciar un proceso de simulación, es importante conocer profundamente el funcionamiento del modelo de simulación. En el caso del marco de simulación MixiM, es necesario estudiar detalladamente los procesos involucrados con la contienda y su coherencia con los estándares WAVE.
- Se debe poner atención al cálculo de tiempos pues es necesario usar contadores para controlar algunos eventos. Particularmente el cálculo de tiempo para un contador que determina el tiempo de espera de un ACK debe ser situado teniendo en cuenta que en MixiM hay retardos de tiempo implementados en la comunicación entre capas.
- Para la simulación de una red VANET es necesario tener en cuenta la correcta comunicación entre los simuladores de red OMNET++ y SUMO a través de un enlace TCP, que debe ser establecido antes de proceder a cualquier proceso de experimentación.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

- **Modelo basado en teoría de juegos ampliado.** El modelo presentado en el presente documento toma en consideración una contienda CSMA/CA básica, esto es, sin mensajes RTS o CTS. Al Considerar un CSMA/CA con dichos mensajes, el modelo debe ser reconsiderado para incorporar nuevos elementos a su estructura. También se debe incorporar al modelo una o varios componentes que den cuenta de las necesidades de los servicios soportados por la red en términos de latencia.
- **Optimización del algoritmo RAG para QoS.** Ya que el algoritmo RAG permite reducir la tasa de pérdidas pero con consecuencias negativas en términos de latencia, se debe mejorar el algoritmo de acuerdo con los requerimientos de QoS asociados con ciertos servicios soportados sobre las VANET. Esto se consigue mediante la calibración de los factores que, en el modelo, representan la utilidad asociada a una transmisión exitosa de trama y el costo asociado a la colisión de una trama.
- **Estudio matemático del modelo.** El estudio matemático de la dinámica del modelo generado es fundamental para el diseño de algoritmos de contienda que respondan de manera precisa a las necesidades de diseño. Mediante este trabajo es posible analizar el juego en términos del equilibrio de Nash, con lo cual el diseño de algoritmos se hace más preciso.
- **Método de diseño de algoritmos de contienda.** La sistematización de una metodología de diseño permite generar algoritmos basados en Teoría de Juegos pertinentes en contextos de contienda diversos. El objetivo de este trabajo es generar un marco teórico y una serie de claves para la generación de algoritmos similares al desarrollado en el presente trabajo en contextos semejantes.
- **Desarrollo de un entorno de simulación para algoritmos de contienda basados en Teoría de Juegos.** El entorno de simulación orientado a contienda, con énfasis en la

recolección de parámetros de desempeño que permitan analizar detalladamente el fenómeno de contienda, constituye una herramienta valiosa para investigaciones relacionadas con la contienda.

- **Aplicación de la Teoría de Juegos en fenómenos distintos a la contienda.** Procesos de investigación similares al descrito en el presente documento, enfocado en uno de los fenómenos de interacción presentes en las redes de telecomunicaciones (Control de potencia de transmisión, asignación de canal radio, enrutamiento), permiten alcanzar una comprensión más amplia de la relación entre la Teoría de Juegos y las Telecomunicaciones.

REFERENCIAS

- [1] R. Reinders, M. van Eenennaam, G. Karagiannis, and G. Heijenk, "Contention window analysis for beaconing in VANETs," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, 2011, pp. 1481–1487.
- [2] H. Moustafa, S. Senouci, and M. Jerbi, "Chapter 1: Introduction to Vehicular Networks," in *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 1a Edición., Boston, Massachusetts, USA.: Auerbach Publications, 2009.
- [3] H. Hartenstein and K. P. Laberteaux, "A tutorial survey on vehicular ad hoc networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 6, pp. 164–171, Jun. 2008.
- [4] S. Eichler, "Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard," presented at the Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC), 2005, pp. 1–5.
- [5] A. MacKenzie and S. B. Wicker, "Game theory in communications: motivation, explanation, and application to power control," in *IEEE Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01*, 2001, vol. 2, pp. 821–826 vol.2.
- [6] M. Ghazvini, N. Movahedinia, K. Jamshidi and N. Moghim, "Game Theory Applications in CSMA Methods," Tutorial, 2012.
- [7] S. Al-Sulfan, M. Al-Doori, A. Al-Bayanti, and H. Zedan, "A Comprehensive Survey on Vehicular Ad Hoc Network," presented at the Journal of Network and Computer Applications, 2013.
- [8] R. Baumann, "Vehicular Ad hoc Networks (VANET)," M.S thesis, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Alemania, 2004.
- [9] *Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Standard 802.11p, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, 2010.
- [10] S. Gräfing, P. Mähönen and J. RiiHijärvi, "Performance Evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for Vehicular Communications," presented at the Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2010, pp. 344–348.
- [11] *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services*, IEEE Standard 1609.3, 2010.
- [12] *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-channel Operation*, IEEE Standard 1609.4, 2011.
- [13] C. Campolo, A. Vinel, A. Molinaro, and Y. Koucheryavy, "Modeling Broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Networks," *IEEE Commun. Lett.*, pp. 199 – 201, Feb. 2011.

- [14] C. Campolo, A. Cortese and A. Molinaro, "CRaSCH: A cooperative Scheme for Service Channel Reservation in 802.11p/WAVE Vehicular Ad Hoc Networks," presented at the Conference on Ultra-Modern Telecommunications & Workshops ICUMT 09 International, 2009, pp. 1 – 8.
- [15] *Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Standard 802.11, 2012.
- [16] *IEEE 802.11e/D13.0, Draft Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements*, IEEE Standard IEEE 802.11e, 2005.
- [17] E. Acinelli and D. Vaz, "Introducción a la Teoría de Juegos," Notas Docentes, Universidad de La República, Facultad de Ciencias Sociales – Departamento de Economía, Montevideo, 1996.
- [18] T. Turocy and B. von Stengen, "Game Theory," CDAM Research Report LSE-CDAM-2001-09, 2001.
- [19] M. Osborne, *An Introduction to Game Theory*. Reino Unido: Oxford University Press, 2000.
- [20] V. Miramá, "Control de Potencia Basado en Teoría de Juegos en Comunicaciones Inalámbricas," M.S thesis, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, 2012.
- [21] Y. Xiao, X. Shan and Y. Ren, "Game Theory Models for IEEE 802.11 DCF in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 22–26, Mar. 2005.
- [22] Y. Shoham and K. Brown, *Multiagent Systems: Algorithmic, Game Theoretic and Logical Foundations*. Nueva York: Cambridge University Press, 2010.
- [23] S. Lasaulce and H. Tembine, *Game Theory and Learning for Wireless Networks*. Oxford: Academic Press Elsevier, 2011.
- [24] L. Zhao, H. Zhang, and J. Zhang, "Using Incompletely Cooperative Game Theory in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008*, 2008, pp. 1483–1488.
- [25] L. Ying, H. Rong-ning, and X. Li, "The Improvement of the Backoff Window Algorithm Based on the Game Theory in Wireless Sensor Network," in *2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS)*, 2010, vol. 2, pp. 436–439.
- [26] L. Zhao, J. Zhang and H. Zhang, "Using Incompletely Cooperative Game Theory in Wireless Mesh Networks," *IEEE Netw.*, vol. 22, pp. 39–44, 2008.

- [27] K. Akkarajitsakul, E. Hossain, D. Niyato and D. In Kim, "Game Theoretic Approaches for Multiple Access in Wireless Networks: A Survey.," IEEE Communications Surveys and Tutorials. Survey, 2011.
- [28] Guopeng Zhang, Hailin Zhang, and Liqiang Zhao, "A novel MAC scheme for wireless LANs from the perspective of game theory," in *IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks, 2007. (CCWMSN07)*, 2007, pp. 112–116.
- [29] H. Minooei and H. Nojumi, "Performance evaluation of a new backoff method for IEEE 802.11," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 18, pp. 3698–3704, Dec. 2007.
- [30] M. Felegyhazi, M. Cagalj, and J.-P. Hubaux, "Efficient MAC in cognitive radio systems: A game-theoretic approach," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 4, pp. 1984–1995, Apr. 2009.
- [31] J. Konorski, "A Game-Theoretic Study of CSMA/CA Under a Backoff Attack," *IEEEACM Trans. Netw.*, vol. 14, no. 6, pp. 1167–1178, Dec. 2006.
- [32] L. Chen, S. H. Low, and J. C. Doyle, "Random Access Game and Medium Access Control Design," *IEEEACM Trans. Netw.*, vol. 18, no. 4, pp. 1303–1316, Aug. 2010.
- [33] S. Flam, "Equilibrium, Evolutionary Stability and Gradient Dynamics," presented at the International Game Theory Review, 2002, vol. 4, pp. 357 – 370.
- [34] S. Chowdhury, S. Dutta, K. Mitra, D. K. Sanyal, M. Chattopadhyay, and S. Chattopadhyay, "Game-Theoretic Modeling and Optimization of Contention-Prone Medium Access Phase in IEEE 802.16/WiMAX Networks," in *2008 Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology Biomedical Applications*, 2008, pp. 335–342.
- [35] L. Chen, S. H. Low, and J. C. Doyle, "Contention control: A game-theoretic approach," in *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control*, 2007, pp. 3428–3434.
- [36] L. Chen, T. Cui, S. H. Low, and J. C. Doyle, "A Game-Theoretic Model for Medium Access Control," presented at the Proc. 3rd International ICST Conference on Wireless Internet, 2007.
- [37] R. Abraham, J. Marsden, and T. Ratiu, *Manifolds, Tensors, Analysis, and Applications*, 2nd ed. New York: Springer-Verlag Publishing Company, Inc., 1988.
- [38] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, Mar. 2000.
- [39] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, "New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2005, vol. 3, pp. 1550–1561 vol. 3.
- [40] M. Torres, "Estudio y Simulación de Redes Ad-Hoc Vehiculares VANETs.," Trabajo de Grado de Pregrado, Universidad Católica de Pereira, Pereira, 2013.

- [41] H. Samaniego, "Simulacion de Redes Vehiculares / VANET en Entornos Reales," Trabajo Fín de Master, Universidad de Málaga, Málaga, España, 2012.
- [42] D. Chavarro and O. Orozco, "Impacto de la Velocidad y Modelo de Movilidad en una Comunicación de Datos de una Red Vehicular.," Trabajo de Grado de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, 2013.
- [43] "SUMO - Simulation of Urban Mobility." [Online]. Available: http://sumo-sim.org/userdoc/SUMO_User_Documentation.html. [Accessed: 15-Apr-2014].
- [44] Universidad Politécnica de valencia, "Grupo de Redes en Computadores." [Online]. Available: <http://www.grc.upv.es/Software/citymob.html>. [Accessed: 22-Apr-2014].
- [45] "VanetMobiSim - Newcom." [Online]. Available: <http://vanet.eurecom.fr/>. [Accessed: 17-Apr-2014].
- [46] V. Khairnar and S. Pradhan, "Mobility Models for Vehicular Ad-hoc Network Simulation," presented at the International Journal of Computer Applications, 2010, vol. 11.
- [47] "OMNET++ Network Simulation Framework." [Online]. Available: <http://www.omnetpp.org/>. [Accessed: 22-Apr-2014].
- [48] "Main Page," *Nsnam*. [Online]. Available: http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Main_Page. [Accessed: 15-Apr-2014].
- [49] "What is ns-3 « ns-3." [Online]. Available: <http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>. [Accessed: 24-Apr-2014].
- [50] "About GTNetS," *GTNetS - Home*. [Online]. Available: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/>. [Accessed: 25-Apr-2014].
- [51] R. Mangharam, D. Weller, R. Rajkumar, P. Mudalige, and F. Bai, "GrooveNet: A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks," in *2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking Services*, 2006, pp. 1–8.
- [52] "Traffic and Network Simulation Environment," *TraNS*. [Online]. Available: <http://lca.epfl.ch/projects/trans/>. [Accessed: 28-Apr-2014].
- [53] "MobiREAL: realistic network simulator for MANET," *MobiREAL- A Realistic Network Simulator*. [Online]. Available: <http://www.mobireal.net/>. [Accessed: 28-Apr-2014].
- [54] C. Sommer, "Veins," *Documentation*. [Online]. Available: <http://veins.car2x.org/documentation/>. [Accessed: 30-Apr-2014].
- [55] R. Leiva, "Simulación de VANETS (Vehicular Ad-Hoc Networks)," Trabajo Final de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, 2007.
- [56] P. González, "Estudio del Simulador de Redes Vehiculares VEINS," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2012.

- [57] O. Ulgen, J. Black, B. Johnsonbaugh, and R. Klungle, "Simulation Methodology- A Practitioner's Perspective," University of Michigan-Dearborn and Production Modeling Corporation, Dearborn, MI ., 2006.
- [58] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building," in *Simulation Methodology – Discrete Event Simulation*, Canadá: Ontario, 2003.
- [59] *Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*. SAE Std. J2735., SAE Int., DSRC Committee., 2009.
- [60] L. Hendriks, "Effects of Transmission Queue Size, Buffer and Scheduling Mechanisms on the IEEE 802.11p Beacons Performance," *15th Twente Stud. Conf. Univ. Twente Fac. Electr. Eng. Math. Comput. Sci.*, 2011.
- [61] C. Quadros, A. Santos, M. Gerla, and E. Cerqueira, "A Multi-flow-driven Mechanism to Support Live Video Streaming on VANETs.," presented at the Anais do 32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC 2014, 2014.