

ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA



**Daniel Felipe Méndez Bonilla
Anderson David Rodríguez Narváez**

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, Agosto de 2014

ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA



Daniel Felipe Méndez Bonilla
Anderson David Rodríguez Narváz

**Monografía presentada como requisito para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Director: Víctor Fabián Mirama 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, Agosto de 2014



TABLA DE CONTENIDO

1	CONCEPTOS GENERALES	3
1.1	REDES VEHICULARES AD-HOC	3
1.2	ARQUITECTURA VANET	4
1.2.1	Dominio en el Vehículo	4
1.2.2	Dominio Ad-Hoc (<i>Ad-Hoc Domain</i>).....	5
1.2.3	Dominio de infraestructura	5
1.3	SERVICIOS VANET	5
1.4	ESTÁNDARES	7
1.4.1	802.11p.....	7
1.4.2	WAVE.....	8
1.4.3	Mensajes WSA.....	11
1.5	CONTROL DE POTENCIA	13
1.5.1	Control En Lazo Abierto.....	13
1.5.2	Control En Lazo Cerrado.....	14
1.5.3	Control de potencia centralizado (CPC, Centralized Power Control).....	14
1.5.4	Control de Potencia Distribuido (DPC, Distributed Power Control).....	14
1.6	CONTROL DE POTENCIA EN REDES VANET.....	14
1.6.1	Control de potencia en redes Ad-Hoc	16
1.6.2	Control de potencia en redes MANET	18
1.6.3	Selección de Procedimientos de Control de Potencia	18
1.6.4	Descripción detallada del algoritmo de control de potencia MCA.	21
1.7	ASIGNACIÓN DE ESPECTRO EN REDES VANET	23
1.7.1	Esquemas cooperativos de asignación de espectro en redes VANET.....	24
1.8	CAPACIDAD EN REDES VANET	24
2	MODELADO DE UNA RED VANET E IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA	27
2.1	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	27



ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA

Anderson David Rodríguez Narváez

Daniel Felipe Méndez Bonilla

2.2	FASE 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	27
2.2.1	Objetivo del estudio	27
2.2.2	Especificaciones.....	28
2.2.3	Delimitación del estudio.....	28
2.3	FASE 2: DISEÑO DEL ESTUDIO	29
2.3.1	Supuestos Generales	29
2.3.2	Modelos requeridos	29
2.3.3	Requerimientos de Animación	30
2.3.4	Selección de la Herramienta de simulación	30
2.3.5	Datos disponibles y datos necesarios.....	32
2.4	FASE 3: DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL	32
2.4.1	Identificación de los elementos dinámicos del sistema.....	32
2.4.2	Componentes del sistema	32
2.4.3	Colección de estadísticas y Resultados	34
2.5	FASE 4: FORMULACIÓN DE VARIABLES, SUPOSICIONES Y DEFINICIÓN DE PROCESOS	35
2.5.1	Acceso al servicio e intercambio de datos en una red VANET	35
2.5.2	Adaptación del algoritmo MCA	37
2.5.3	Nuevo Algoritmo de Asignación de Espectro Cooperativo	41
2.5.4	Clases de Archivos	45
2.5.5	Topología y Componentes de la red	46
2.5.6	Archivos y Clases C++	48
2.5.7	Mensajes	48
2.5.8	Configuración del Modelo.....	48
2.6	FASE 5: CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	49
2.7	FASE 6: EXPERIMENTACIÓN CON EL MODELO.....	49
2.8	FASE 7: DOCUMENTACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	49
3	EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
3.1	PRUEBAS PRELIMINARES DE FUNCIONAMIENTO	52
3.1.1	Establecimiento de la comunicación entre dos nodos.....	52
3.1.2	Variación de la potencia de transmisión	53
3.1.3	Asignación del canal de radio.....	54



ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA

Anderson David Rodríguez Narváez

Daniel Felipe Méndez Bonilla

3.2	EXPERIMENTACIÓN ESCENARIO 1.....	56
3.2.1	Presentación y Análisis de resultados	56
3.3	EXPERIMENTACIÓN ESCENARIO 2.....	74
3.3.1	Presentación y Análisis de resultados	74
4	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	92
4.1	CONCLUSIONES	92
4.1.1	Con respecto al desempeño de la red y los parámetros de QoS	92
4.1.2	Con respecto a los algoritmos de SA y PC	92
4.1.3	Con respecto a la capacidad de la red.....	93
4.2	RECOMENDACIONES	93
4.3	ESTUDIOS Y TRABAJOS FUTUROS.....	94



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Aplicaciones presentes en VANET. Tomada de [7].....	7
Tabla 1.2 Descripción mensaje WSA. Por los autores.....	12
Tabla 1.3 Descripción mensaje WSM. Por los autores.....	12
Tabla 1.4 Comparación de los algoritmos de PC. Por los autores.....	20
Tabla 2.1 Datos disponibles y datos necesarios. Por los autores.....	32
Tabla 2.2 Canal de control y canales de servicio. Por los autores.....	35
Tabla 2.3 Registro de proveedores. Por los autores	37
Tabla 2.4 Registro de Nodos. Por los autores	37
Tabla 2.5 Parámetros de Funcionamiento de MCA. Por los autores	38
Tabla 2.6 Componentes del modelo de simulación. Por los autores.....	48
Tabla 2.7 Parámetros de simulación	49
Tabla 3.1 Aplicaciones VANET con requerimientos de QoS. Tomada de [38]	51
Tabla 3.2 Configuración de los nodos y tiempos de simulación	52
Tabla 3.3 Configuración de los nodos y tiempos de simulación	53
Tabla 3.4 Configuración de los nodos y tiempos de simulación	54
Tabla 3.5 Configuración Escenario 1	56
Tabla 3.6 Comparación de los porcentajes de pérdida de paquetes en el escenario 1.....	73
Tabla 3.7 Configuración del escenario 2	74
Tabla 3.8 Comparación de los porcentajes de pérdida de paquetes en el escenario 2.....	91



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Arquitectura de referencia para VANET C2C-CC. Adaptada de [4]	4
Figura 1.2 Frecuencias de operación. Tomada de [10]	8
Figura 1.3 Modelo de referencia WAVE. Tomada de IEEE 1609.4 [12].....	9
Figura 1.4 Acceso directo y acceso alternado. Tomada de estándar IEEE1609.4 [12]	10
Figura 1.5 Solicitud del servicio y acceso al canal. Adaptada de [13]	11
Figura 1.6 Formato mensaje WSA. Adaptada de [13]	11
Figura 1.7 Formato mensaje WSM. Adaptada de [13].....	12
Figura 1.8 Topología de congestión vehicular. Por los autores	15
Figura 1.9 Topología vehicular dispersa. Por los autores.....	15
Figura 1.10 Topología de una red con CLUSTERPOW. Tomada de [23].....	16
Figura 1.11 Tabla de enrutamiento de CLUSTERPOW. Tomada de [23]	17
Figura 1.12 Comparación entre a) una red Ad-Hoc sin control de topología y b) una red Ad-Hoc Con control de topología. Tomada de [25]	18
Figura 1.14 Interacción de los nodos en el área de interferencia. Tomada de [24]	22
Figura 1.15 Modelo de interferencia entre nodos. Tomada de [30].....	25
Figura 2.1 Arquitectura VEINS. Tomada de [33]	31
Figura 2.2 Componentes del sistema. Por los Autores	33
Figura 2.3 Acceso al servicio e Intercambio de paquetes. Por los autores	36
Figura 2.4 Diagrama de flujo del algoritmo MCA. Por los autores.....	39
Figura 2.5 Ejecución del Algoritmo MCA. Por los autores	41
Figura 2.6 Diagrama de flujo de NACSA. Por los autores	44
Figura 3.1 Sector centro urbano de Popayán. Tomada de Open Street Map.....	52
Figura 3.2 Interpretación grafica transmisiones en el tiempo	53
Figura 3.3 Potencia de transmisión nodo 4 con MCA	54
Figura 3.4 Potencia de transmisión nodo 4 sin MCA	54
Figura 3.5 Canales en el tiempo nodo 16.....	55
Figura 3.6 Canales en el tiempo nodo 16 con NACSA	55
Figura 3.7 Canales en el tiempo nodo 16 zoom con NACSA	56
Figura 3.8 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 30 nodos.....	57
Figura 3.9 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 50 nodos.....	58
Figura 3.10 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 100 nodos	58
Figura 3.11 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 150 nodos	58
Figura 3.12 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 200 nodos	59
Figura 3.13 Transmisiones simultáneas modelo VANET 30 nodos	59
Figura 3.14 Transmisiones simultáneas modelo VANET 50 nodos	59
Figura 3.15 Transmisiones simultáneas modelo VANET 100 nodos	60
Figura 3.16 Transmisiones simultáneas modelo VANET 150 nodos	60



ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA

Anderson David Rodríguez Narváez

Daniel Felipe Méndez Bonilla

Figura 3.17 Transmisiones simultáneas modelo VANET 200 nodos	60
Figura 3.18 Throughput modelo VANET SA/PC 30 nodos	62
Figura 3.19 Throughput modelo VANET SA/PC 50 nodos	62
Figura 3.20 Throughput modelo VANET SA/PC 100 nodos	63
Figura 3.21 Throughput modelo VANET SA/PC 150 nodos	63
Figura 3.22 Throughput modelo VANET SA/PC 200 nodos	64
Figura 3.23 Throughput modelo VANET 30 nodos	64
Figura 3.24 Throughput modelo VANET 50 nodos	64
Figura 3.25 Throughput modelo VANET 100 nodos	65
Figura 3.26 Throughput modelo VANET 150 nodos	65
Figura 3.27 Throughput modelo VANET 200 nodos	65
Figura 3.28 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 30 nodos	67
Figura 3.29 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 50 nodos	67
Figura 3.30 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 100 nodos	68
Figura 3.31 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 150 nodos	68
Figura 3.32 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 200 nodos	68
Figura 3.33 Latencia promedio modelo VANET 30 nodos	69
Figura 3.34 Latencia promedio modelo VANET 50 nodos	69
Figura 3.35 Latencia promedio modelo VANET 100 nodos	70
Figura 3.36 Latencia promedio modelo VANET 150 nodos	70
Figura 3.37 Latencia promedio modelo VANET 200 nodos	70
Figura 3.38 Comparación del uso de los canales entre el modelo VANET SA/PC (izquierda) y el modelo VANET (derecha)	72
Figura 3.39 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 30 nodos	74
Figura 3.40 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 50 nodos	75
Figura 3.41 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 100 nodos	75
Figura 3.42 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 150 nodos	75
Figura 3.43 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 200 nodos	76
Figura 3.44 Transmisiones simultáneas modelo VANET 30 nodos	76
Figura 3.45 Transmisiones simultáneas modelo VANET 50 nodos	77
Figura 3.46 Transmisiones simultáneas modelo VANET 100 nodos	77
Figura 3.47 Transmisiones simultáneas modelo VANET 150 nodos	77
Figura 3.48 Transmisiones simultáneas modelo VANET 200 nodos	78
Figura 3.49 Transmisiones simultáneas vs nodos	79
Figura 3.50 Throughput modelo VANET SA/PC 30 nodos	80
Figura 3.51 Throughput modelo VANET SA/PC 50 nodos	80
Figura 3.52 Throughput modelo VANET SA/PC 100 nodos	81
Figura 3.53 Throughput modelo VANET SA/PC 150 nodos	81
Figura 3.54 Throughput modelo VANET SA/PC 200 nodos	81
Figura 3.55 Throughput modelo VANET 30 nodos	82
Figura 3.56 Throughput modelo VANET 50 nodos	82



ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA

Anderson David Rodríguez Narváez

Daniel Felipe Méndez Bonilla

Figura 3.57 Throughput modelo VANET 100 nodos.....	82
Figura 3.58 Throughput modelo VANET 150 nodos.....	83
Figura 3.59 Throughput modelo VANET 200 nodos.....	83
Figura 3.60 Throughput vs Nodos	84
Figura 3.61 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 30 nodos.....	85
Figura 3.62 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 50 nodos.....	85
Figura 3.63 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 100 nodos.....	86
Figura 3.64 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 150 nodos.....	86
Figura 3.65 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 200 nodos.....	86
Figura 3.66 Latencia promedio modelo VANET 30 nodos.....	87
Figura 3.67 Latencia promedio modelo VANET 50 nodos.....	87
Figura 3.68 Latencia promedio modelo VANET 100 nodos.....	88
Figura 3.69 Latencia promedio modelo VANET 150 nodos.....	88
Figura 3.70 Latencia promedio modelo VANET 200 nodos.....	88
Figura 3.71 Comparación del uso de los canales entre el modelo VANET SA/PC (izquierda) y el modelo VANET (derecha)	90



LISTA DE ACRÓNIMOS

AC	: <i>Access Category</i> , Categoría de Acceso
AIFS	: <i>Arbitrary Inter Frame Space</i> , Espacio de Inter Trama Arbitrario
AU	: <i>Application Unit</i> , Unidad de Aplicación
CCH	: <i>Control Channel</i> , Canal de Control
CSMA/CA	: <i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones
EDCA	: <i>Enhanced Distributed Channel Access</i> , Acceso al Canal Distribuido Mejorado
GPS	: <i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global
ITS	: <i>Intelligent Transportation Systems</i> , Sistemas de Transporte Inteligente
MAC	: <i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio
MANET	: <i>Mobile Ad-Hoc Networks</i> , Redes Móviles Ad-Hoc
MCA	: <i>Minimum Cessated Area</i> , Mínima Área de Cesado
NACSA	: <i>New Algorithm for Cooperative Spectrum Allocation</i> , Nuevo Algoritmo de Asignación de Espectro Cooperativo
NIC	: <i>Network Interface Card</i> , Tarjeta de Interfaz de Red
OBU	: <i>On-Board Unit</i> , Unidad de Abordo
OFDM	: <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
PC	: <i>Power Control</i> , Control de Potencia
PLME	: <i>Physical Layer Management Entity</i> , Entidad de Manejo de Capa Física
QoS	: <i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
RSU	: <i>Road Side Unit</i> , Unidad del lado de la Carretera
SA	: <i>Spectrum Allocation</i> , Asignación de Espectro
SCH	: <i>Service Channel</i> , Canal de Servicio
SINR	: <i>Signal to Interference Plus Noise Ratio</i> , Relación de Señal a Interferencia más Ruido
TCP	: <i>Transmision Control Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión
VANET	: <i>Vehicular Ad-Hoc Networks</i> , Redes Vehiculares Ad-Hoc
V2I	: <i>Vehicle to Infrastructure</i> , Vehículo a Infraestructura



ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN REDES VANET IMPLEMENTANDO PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA

Anderson David Rodríguez Narváez

Daniel Felipe Méndez Bonilla

- V2V** : *Vehicle to Vehicle*, Vehículo a Vehículo
- WAVE** : *Wireless Access in Vehicular Environments*, Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares
- WLAN** : *Wireless Local Area Network*, Redes Inalámbricas de Area Local
- WME** : *WAVE Management Entity*, Entidad de Gestión WAVE
- WSA** : *WAVE Service Advertising*, Mensajes de Anuncio WAVE
- WSM** : *WAVE Short Messages*, Mensajes Cortos WAVE
- WSMP** : *WAVE Short Messages Protocol*, Protocolo de Mensajes Cortos WAVE



INTRODUCCIÓN

En los últimos años han aparecido tecnologías de redes inalámbricas con el fin de cubrir las necesidades de una sociedad en creciente desarrollo. Dentro de estas se encuentran las Redes Vehiculares Ad-Hoc (VANET, *Vehicular Ad-Hoc Networks*), las cuales tienen el propósito de mejorar la seguridad vial, como también ofrecer servicios de comunicaciones a los pasajeros de los vehículos [1].

Las redes VANET se forman espontáneamente, sin la necesidad de depender de una infraestructura central que regule todo el sistema, y a diferencia de otras redes inalámbricas, estas poseen características particulares como son la alta movilidad, la topología dinámica, la variación del número de nodos, la rápida variación del canal de radio, que atraen el interés de diversos investigadores [2].

El interés por mejorar el desempeño de las tecnologías inalámbricas, va acompañada con la invención y la reutilización de métodos que permiten mejorar la eficiencia de estas redes, con el fin de obtener un óptimo funcionamiento de los servicios desplegados. En lo referente a las VANET, el buen desempeño de la red implica que las aplicaciones destinadas a controlar el tráfico vehicular y a reducir la accidentalidad vial trabajen de forma adecuada. Sin embargo existen pocos estudios que determinen cualitativa o cuantitativamente el efecto que tiene aplicar procedimientos para el acceso al canal radio y el manejo de la potencia, sobre la cantidad de vehículos que puede soportar una VANET, teniendo en cuenta los parámetros de desempeño de la red y de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*).

El siguiente trabajo de grado tiene como propósito analizar qué sucede con la capacidad de una red VANET, entendida como la cantidad de vehículos que puede soportar, al implementar procedimientos de Control de Potencia (PC, *Power Control*) y de Asignación de Espectro (SA, *Spectrum Allocation*), manteniendo parámetros mínimos de QoS.

El presente documento se encuentra dividido en cuatro capítulos, estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introduce los conceptos fundamentales relacionados con las redes VANET. También se realiza un estudio acerca de los algoritmos existentes para el control de potencia y la asignación de espectro, además se hace una selección de los algoritmos más adecuados para su implementación.

Capítulo 2. Se describe la metodología de simulación y los pasos correspondientes para la construcción del modelo y su implementación.



Capítulo 3. Se especifica los escenarios de simulación y sus características, se describen las pruebas preliminares de funcionamiento de los modelos y se detallan los parámetros de evaluación. Finalmente se presentan los resultados obtenidos y su análisis.

Capítulo 4. Se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo de grado. También se presentan una serie de ideas para futuras líneas de investigación relacionadas con este campo.



CAPITULO 1

CONCEPTOS GENERALES

1.1 REDES VEHICULARES AD-HOC

Las Redes Vehiculares Ad-Hoc (VANET, *Vehicular Ad-Hoc Networks*) son un caso especial de las Redes Móviles Ad-Hoc (MANET, *Mobile Ad-Hoc Networks*), donde las comunicaciones se dan entre un conjunto de nodos independientes, que para este caso son los vehículos, sin la necesidad de depender de una infraestructura central que regule el sistema, así también como el acceso al canal radio y el manejo de la potencia [1].

Las redes VANET fueron concebidas con el objetivo de reducir la accidentalidad vial, mediante aplicaciones de seguridad que transmiten mensajes a través de la red inalámbrica. A diferencia de MANET, VANET posee unas características particulares de las cuales las más importantes a mencionar son [2]:

- **Alta movilidad:** Los vehículos poseen una gran variación en cuanto a velocidad, aceleración y dirección del movimiento. En carretera pueden moverse a unos 100 Km/h y en ciudades hasta los 60 Km/h.
- **Topología dinámica:** En la red los patrones de movimiento y de agrupación de los vehículos cambian regularmente [2], [3].
- **Rápida variación del canal en el tiempo:** La conectividad entre los nodos conjuntos es esporádica e intermitente debido a que las condiciones de propagación del canal radio varía en el tiempo constantemente [2].
- **Variación del número de nodos con velocidad independiente y con velocidad correlacionada:** Se refiere a que la cantidad de vehículos que se mueven en conjunto a una misma velocidad con respecto a los vehículos que transitan de manera independiente, puede variar repentina y significativamente.
- **Movilidad predecible:** Debido al diseño de las vías, es fácil predecir el movimiento de los vehículos. Además debido al uso de dispositivos que utilizan el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*), los puntos red y los sensores de movimiento dentro del vehículo, es posible determinar la ubicación, trayectoria y velocidad del vehículo.
- **Ancho de banda limitado:** Como en todas las redes inalámbricas, posee una limitación en cuanto al uso de recursos y velocidad de transmisión dentro de la red.

- **Energía ilimitada:** No posee inconvenientes en el consumo de potencia de los dispositivos puesto que el vehículo puede suministrar de manera permanente la energía necesaria para su funcionamiento, sin embargo existe un límite para los niveles de potencia en la transmisión de datos.

1.2 ARQUITECTURA VANET

Según el modelo propuesto por la *CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C-CC)* como se muestra en la Figura 1.1, la arquitectura de una red VANET está compuesta por 3 dominios: Dominio en el Vehículo, Dominio Ad-Hoc y Dominio de Infraestructura [4].

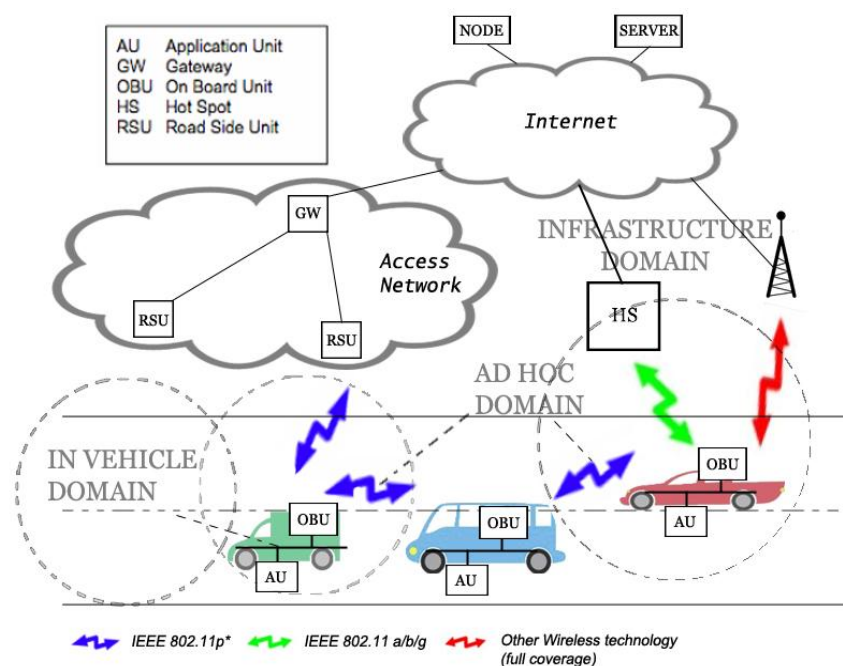


Figura 1.1 Arquitectura de referencia para VANET C2C-CC. Adaptada de [4]

1.2.1 Dominio en el Vehículo

El dominio en el vehículo, se refiere a una red local dentro de cada vehículo, compuesta lógicamente por dos tipos de unidades:

- **Unidad a Bordo (OBU, On-Board Unit):** Es el dispositivo con capacidades de comunicación inalámbrica de corto alcance integrado en el vehículo. Pueden ir una o más dependiendo del diseño y las necesidades de intercambio de información. El conjunto de OBU conforman una red MANET.
- **Unidad de Aplicación (AU, Application Unit):** Es la unidad que ejecuta una o múltiples aplicaciones mientras hace uso de la capacidad de comunicación de la OBU.



Las AU pueden ser computadores portátiles, teléfonos inteligentes, PDA o sensores integrados al vehículo.

1.2.2 Dominio Ad-Hoc (*Ad-Hoc Domain*)

Este dominio está conformado por el conjunto de dominios en el vehículo (red MANET) y por las Unidades al Lado de la Carretera (RSU, *Road Side Unit*) [4], [5].

- **RSU:** Son unidades físicas fijadas a lo largo de las vías y/o en lugares específicos (estaciones de gas, peajes). Entre sus funciones se encuentran extender el rango de las comunicaciones Vehículo a Vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*) [4], proveer de aplicaciones de seguridad durante los recorridos y servir como punto de acceso de internet mediante enlaces con otras infraestructuras de redes [5]. De modo más extenso, la integración entre OBU's Y RSU's puede mirarse como una red Ad-Hoc entre nodos móviles y nodos estáticos [2].

Para la comunicación inter-vehicular existen los siguientes métodos:

- De manera directa mediante un enlace punto a punto.
- Por medio de múltiples saltos (*Multi-Hop*) de vehículo a vehículo cuando no es posible alcanzar el destino en un solo salto.

1.2.3 Dominio de infraestructura

Hace referencia a la comunicación vehicular, con soporte de la red de infraestructura. En este dominio prevalece una comunicación tipo híbrida, es decir, se encuentran comunicaciones del tipo V2V y Vehículo a Infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure*) [4].

El acceso se realiza mediante las RSU o *Hot Spots*¹ (HS) ubicados en el camino, pero en general los vehículos pueden comunicarse a través de nodos de acceso a Internet. Las OBU's pueden estar integradas con otros dispositivos de comunicación inalámbrica que incorporen otras tecnologías como WIFI o tecnologías de redes celulares (WIMAX, GSM, GPRS, UMTS, LTE). Estas capacidades de comunicación pueden ser aprovechadas cuando el acceso por las RSU y los HS sea insuficiente [2].

1.3 SERVICIOS VANET

Aunque en principio las redes VANET fueron diseñadas para el mejoramiento de la movilidad y la seguridad vial, actualmente se ofrecen diversos servicios y aplicaciones de

¹ Hot Spots: traduce al español como punto caliente, y en telecomunicaciones se refiere al punto de acceso inalámbrico por el cual se acceden a los servicios de internet.



información y de entretenimiento [6]. Para este trabajo de grado se ha optado por seguir la clasificación de servicios mostrada en la Tabla 1.1, la cual se basa en la recopilación de servicios hecho en [7].

CATEGORÍA	SITUACIÓN O PROPÓSITO	CASOS DE APLICACIÓN
SEGURIDAD ACTIVA	a. Peligros en la carretera	1. Advertencia curva peligrosa. 2. Advertencia violación de señales de parada en un cruce.
	b. Tráfico anormal y estado de la carretera	1. Alerta vía en obras. 2. Potenciar la visibilidad del conductor. 3. Aviso de infraestructura basada en carretera.
	c. Peligros por colisión	1. Aviso cambio rasante. 2. Alerta cambio de carril. 3. Luces de frenado de emergencia. 4. Advertencia de peatones en la calzada.
	d. Colisión inminente	1. Detección de pre-colisión.
	e. Notificación de Accidente	1. Aviso post-colisión. 2. Aviso de frenado. 3. Servicios SOS.
SERVICIO PÚBLICO	a. Respuesta de emergencia	1. Aviso aproximación a vehículo con emergencia. 2. Servicios de emergencia (ambulancias, bomberos) en escena.
	b. Soporte para autoridades	1. Número de bastidor Electrónico. 2. Licencia electrónica de conducción. 3. Rastreo de vehículos robados
CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DEL TRÁFICO	a. Mejora de la Conducción.	1. Tren de conducción adaptable. 2. Reducción del encandilamiento.
	b. Eficiencia del Tráfico.	1. Notificación de colisión y situación de la calzada. 2. Control inteligente del tráfico. 3. Mejor orientación y cálculo de rutas.
NEGOCIO/ ENTRETENIMIENTO	a. Mantenimiento del vehículo.	1. Diagnostico inalámbrico. 2. Actualización software 3. Recordar aviso de Mantenimiento.
	b. Servicios móviles.	1. Servicio de internet. 2. Mensajería instantánea.



	c. Soluciones empresa.	1. Gestión de flota. 2. Alquiler de coches. 3. Zona de control de acceso. 4. Seguimiento de transporte de materiales peligrosos.
	d. Comercio Electrónico.	1. Pago de peaje 2. Reserva de hotel. 3. Pago de combustible.

Tabla 1.1 Aplicaciones presentes en VANET. Tomada de [7]

1.4 ESTÁNDARES

El funcionamiento de las redes VANET se especifica en los estándares 802.11p y el estándar de Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares (*WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments*), El primero es una enmienda de 802.11a adaptado a un entorno vehicular, el segundo define operaciones propias de las redes vehiculares como son tipo de servicios, operación multicanal, enrutamiento y definición de los mensajes de seguridad.

1.4.1 802.11p

El estándar 802.11p deriva sus características del estándar 802.11a original, el cual especifica de manera general el funcionamiento de las Redes Inalámbricas de Área Local (*WLAN, Wireless Local Area Network*). Entre los cambios realizados en este nuevo estándar se encuentran las modificaciones hechas a nivel físico y a nivel de Control de Acceso al Medio (*MAC, Medium Access Control*) que permiten un funcionamiento apropiado para el entorno vehicular.

A nivel MAC se complementa el método de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (*CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) con el mecanismo de coordinación de Acceso al Canal Distribuido Mejorado (*EDCA, Enhanced Distributed Channel Access*) basado en 802.11e [8].

1.4.1.1 Nivel MAC

Las redes VANET usan CSMA/CA como mecanismo de acceso al medio. El estándar 802.11p incorpora el mecanismo EDCA para asignar diferentes prioridades para las distintas clases de tráfico, para ello clasifica cada paquete en cuatro Categorías de Acceso (*AC, Access Category*), cuyo funcionamiento se especifica en [9].

1.4.1.2 Nivel físico

El nivel físico de una red VANET definido en el estándar 802.11p adopta OFDM y su diseño se basa en el estándar 802.11a.



802.11p opera en la banda de 5.9 GHz, asignada por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) para Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, *Intelligent Transportation Systems*). El estándar define siete canales no traslapados con un ancho de banda de 10MHz. La Figura 1.2, indica las frecuencias de operación de cada canal, así como la potencia máxima en cada uno de los mismos [10].

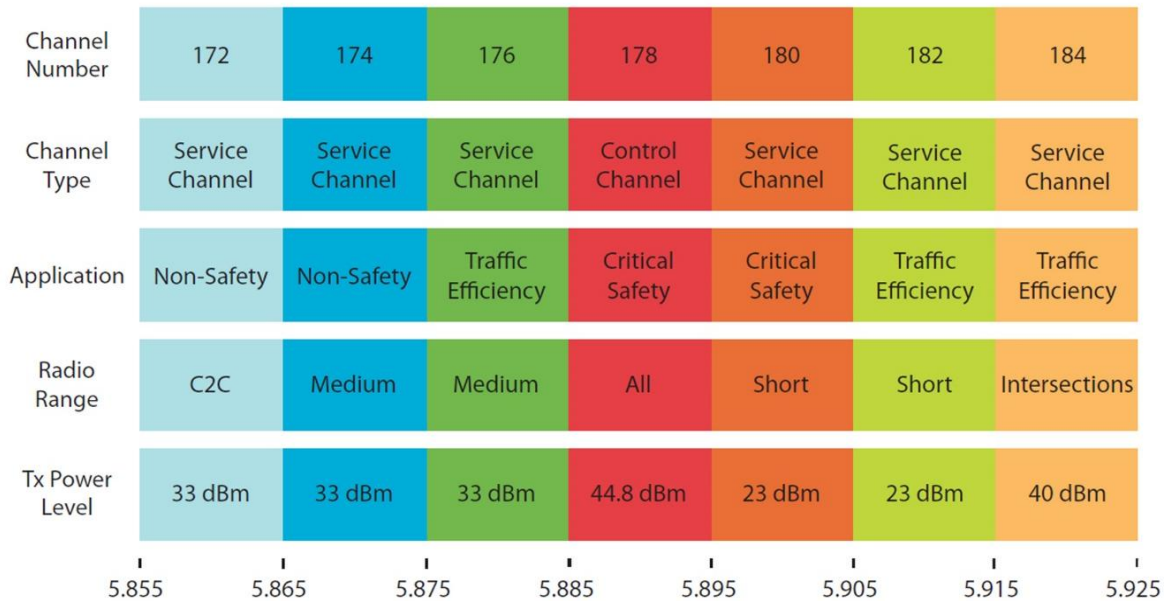


Figura 1.2 Frecuencias de operación. Tomada de [10]

1.4.2 WAVE

WAVE está definido mediante la familia de estándares IEEE 1609. Los diferentes estándares pertenecientes a WAVE definen el funcionamiento de las redes VANET incluyendo operaciones como manejo de seguridad, manejo de recursos y soporte para operación multicanal. WAVE surge ante el conjunto específico de requerimientos como alta movilidad, conexiones por poco tiempo, variación del número de nodos y alto particionamiento de la red [11].

- **IEEE Std. 1609.0:** Describe la arquitectura WAVE indicando como trabajan los diferentes estándares en conjunto, describe además los servicios desplegados entre dispositivos WAVE.
- **IEEE Std. 1609.2-2013:** Define los servicios en lo que se refiere a mensajes de seguridad, formato y procesamiento de los mismos.
- **IEEE Std. 1609.3:** Define los servicios de la capa de transporte y red incluyendo direccionamiento y enrutamiento. Define el formato de los Mensajes Cortos WAVE

(WSM, *WAVE Short Messages*) usados en la comunicación vehicular como alternativa a datagramas IPV6, como mensajes de control o como mensajes de seguridad.

- **IEEE Std. 1609.4:** provee las mejoras que se hacen al IEEE 802.11 para soportar operaciones multicanal.

1.4.2.1 Modelo de referencia de WAVE

Las redes VANET soportan dos tipos de transferencia de datos las basadas en IP y las no basadas en IP. La transferencia de datos basadas en IP se hace mediante el uso de datagramas IPV6 convencionales, las comunicaciones no basadas en IP se realizan mediante el intercambio de mensajes WSM [12].

La Figura 1.3 muestra el modelo de referencia de WAVE el cual establece la pila de protocolos y define las entidades de gestión para el manejo de cada capa (física, acceso al medio y aplicación). Para la capa de aplicación esta la Entidad de Gestión WAVE (WME, *WAVE Management Entity*), para el acceso al medio esta la Entidad de Gestión de la Capa MAC (MLME, *MAC Layer Management Entity*) y para la parte física se encuentra la Entidad de Gestión de la Capa Física (PLME, *Physical Layer Management Entity*).

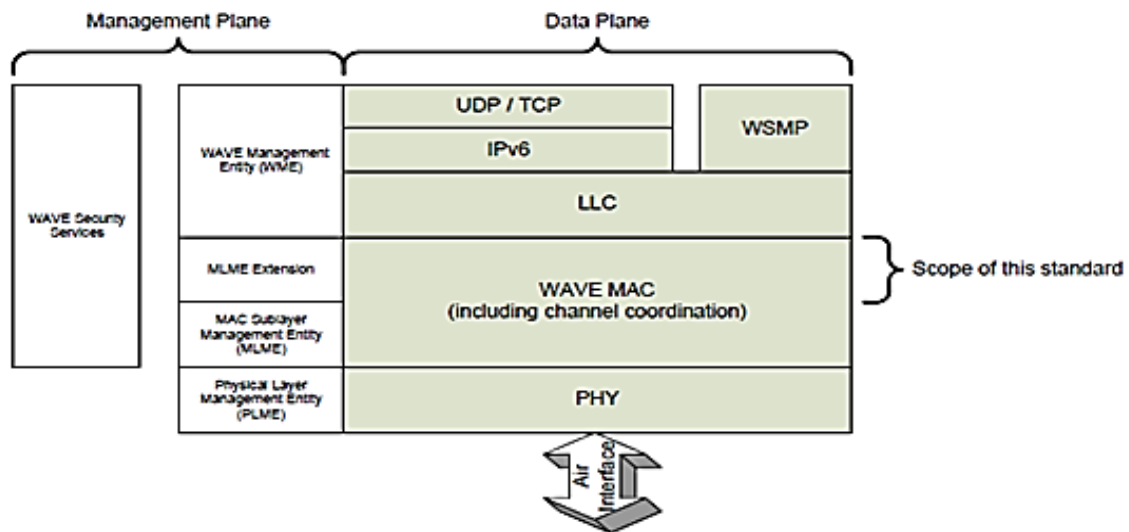


Figura 1.3 Modelo de referencia WAVE. Tomada de IEEE 1609.4 [12]

WAVE define siete canales no traslapados de 10MHz en la banda de 5.9 GHz, seis Canales de Servicio (SCH, *Service Channel*) y un Canal de Control (CCH, *Control Channel*), el cual se usa como canal de referencia para el envío de Mensajes de Anuncio WAVE (WSA, *WAVE Service Advertising*) usados para el reconocimiento. Estos mensajes contienen la posición, la velocidad y las aplicaciones disponibles en los canales SCH. El canal CCH también es usado para las aplicaciones de seguridad, de esta forma los

mensajes destinados a la seguridad y los mensajes destinados a aplicaciones de entretenimiento no compiten por el canal [10].

La coordinación de canal está diseñada para dar soporte a la conmutación entre CCH y SCH. El acceso al canal se puede hacer de dos formas, mediante acceso directo o mediante acceso alternado como se muestra en la Figura 1.4. En el acceso alternado el transceptor permite el cambio de frecuencia de CCH a SCH, mientras que en el acceso alternado se transmite todo el tiempo por CCH.

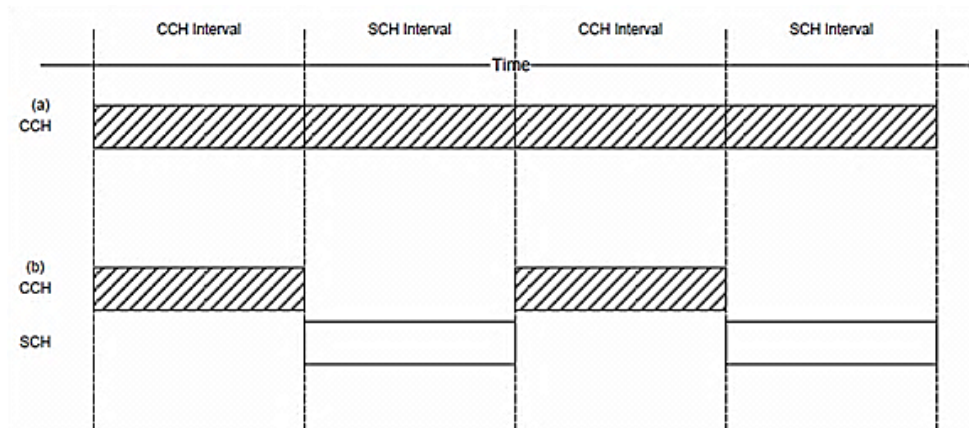


Figura 1.4 Acceso directo y acceso alternado. Tomada de estándar IEEE1609.4 [12]

1.4.2.2 Solicitud de servicio y de acceso al canal

El establecimiento de un servicio entre dispositivos WAVE se hace mediante el uso de mensajes WSA. El estándar WAVE define los roles de proveedor y usuario, el proveedor es el dispositivo que envía periódicamente mensajes WSA indicando la disponibilidad de este dispositivo para intercambiar datos a través de uno o más canales SCH. El usuario es aquel dispositivo que escucha los mensajes WSA y decide si participar o no en el intercambio de datos. El intercambio de datos se puede hacer entre dos o más dispositivos WAVE.

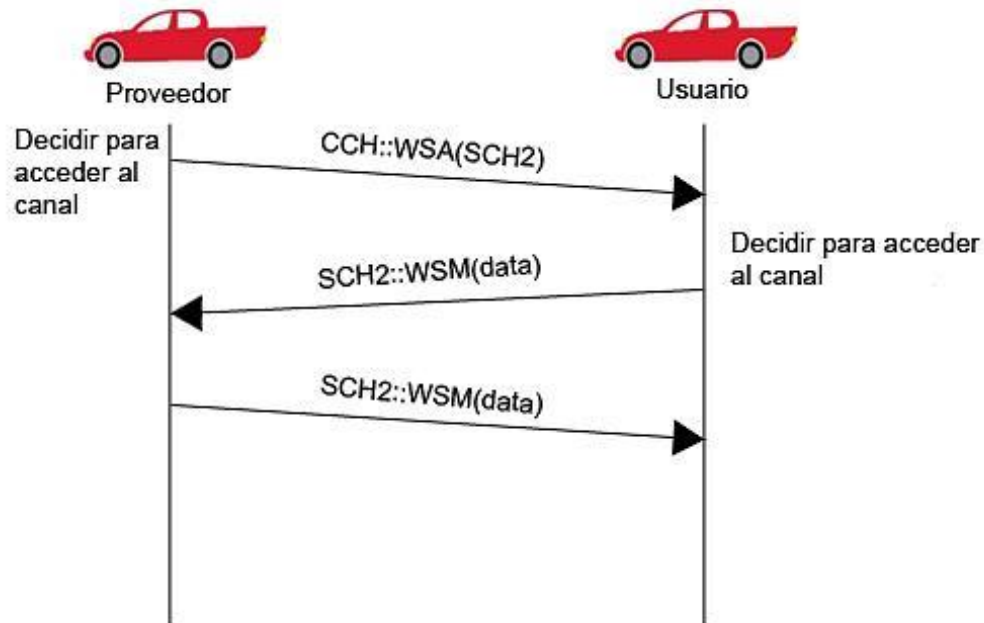


Figura 1.5 Solicitud del servicio y acceso al canal. Adaptada de [13]

La Figura 1.5 muestra el proceso de acceso a un canal de servicio, en donde el proveedor anuncia en la red las características de su servicio (tipo, número de canal), posteriormente si el usuario acepta unirse a ese servicio, puede intercambiar mensajes con el proveedor pero a través del SCH especificado en los mensajes WSA recibidos. Por defecto los dispositivos WAVE operan en canal de control, de igual forma no se especifica los procedimientos ni los algoritmos para escoger el canal de servicio [13].

1.4.3 Mensajes WSA

Los mensajes WSA son mensajes que se intercambian entre el proveedor y el usuario para el establecimiento de un servicio. La Figura 1.6 muestra el formato de un mensaje WSA, se pueden describir los siguientes campos mientras que en la Tabla 1.2 se da una breve descripción de sus campos.



Figura 1.6 Formato mensaje WSA. Adaptada de [13]



CAMPO	DESCRIPCION	PRINCIPALES SUBCAMPOS
HEADER	Contiene la información general del dispositivo WAVE transmisión.	<ul style="list-style-type: none"> •Potencia de Transmisión. •Coordenadas
SERVICE INFO	Contiene la información del servicio ofrecido.	<ul style="list-style-type: none"> •Id servicio •Prioridad servicio •Canales de servicio.
WAVE ROUTING ADVERSING	Provisiona información acerca de la red. Permite el anuncio de servicio IPV6.	NA
CHANNEL INFO	Contiene información de cada canal asociado al servicio.	NA

Tabla 1.2 Descripción mensaje WSA. Por los autores

1.4.3.1 Mensajes WSM

Los mensajes WSM son mensajes para el intercambio de información entre dispositivos WAVE mediante el Protocolo de Mensajes Cortos WAVE (WSMP, *WAVE Short Messages Protocol*). Los mensajes WSM siguen el formato descrito en la Figura 1.7, e igualmente la Tabla 1.3 describe las características de cada uno de los campos.

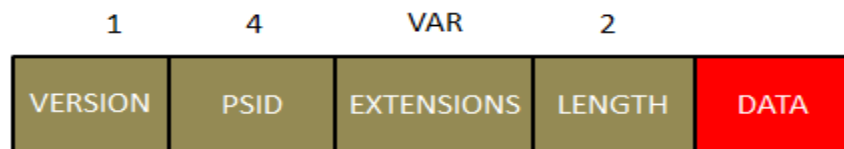


Figura 1.7 Formato mensaje WSM. Adaptada de [13]

CAMPO	DESCRIPCION	PRINCIPALES SUBCAMPOS
VERSIÓN	Versión del protocolo WSM.	NA
PSID	Identificador del servicio.	NA
EXTENSION FIELDS	Campos de extensión, en los que pueden añadirse campos opcionales según se requiera.	<ul style="list-style-type: none"> •Número del canal de servicio •Tasa de transmisión de datos. •Potencia de transmisión.
LENGTH	Indica el tamaño del mensaje WSM	NA
DATA	Contiene el resto de información adicional del mensaje	NA

Tabla 1.3 Descripción mensaje WSM. Por los autores



1.5 CONTROL DE POTENCIA

En general para los sistemas de comunicación inalámbricos bidireccionales [14], el Control de Potencia (PC, *Power Control*) es una característica importante puesto que permite compensar las pérdidas de potencia debido a las variaciones del canal de transmisión y la propagación en el medio. Entre los propósitos de realizar el PC según la teoría convencional de redes inalámbricas [14] se encuentran:

- Maximizar la capacidad del sistema.
- Reducir el consumo de potencia en dispositivos con limitaciones de energía (no es el caso de VANET).
- Ajustar los niveles de potencia en las unidades móviles para compensar las variaciones del canal.
- Reducir la interferencia cocanal².

En la práctica se reconoce que las pérdidas por propagación no son simétricas en los canales debido a la separación de frecuencias, por lo que la asignación de las frecuencias de operación es un factor determinante para el PC en VANET. Existe una restricción en el estándar 802.11p por la cual se limita los máximos valores de potencia con la que se puede transmitir en cada canal, por otro lado en [15] se habla de una relación proporcional entre el aumento de la interferencia y los valores de potencia de la red, así como también su efecto sobre la capacidad y la habilidad de escucha de los nodos. Una consecuencia de esto es que la probabilidad de recepción exitosa de un nodo en la red se verá reducida si la potencia de transmisión es muy baja, el otro caso se da cuando muchos nodos transmiten con una alta potencia en una red altamente congestionada.

En general existen dos formas de realizar PC:

- Control en lazo Abierto
- Control en lazo cerrado

1.5.1 Control En Lazo Abierto

En este esquema, el control es realizado solo por el terminal móvil sin depender de una infraestructura central. El cálculo en lazo abierto está basado en las pérdidas por trayectoria del enlace de bajada [16].

² la interferencia cocanal está relacionada directamente con la suma de todos los niveles de potencia emitidos por todos los móviles que se encuentren en un área determinada [16].



1.5.2 Control En Lazo Cerrado

A diferencia de lazo abierto, los nodos como las estaciones centrales, monitorean constantemente las condiciones del canal, tratando de compensar las atenuaciones y desvanecimientos.

Este método funciona mediante informes o mediciones del canal y dependiendo de los niveles recibidos de potencia, el nodo aumenta o reduce la potencia. Por lo general esta tarea de monitoreo del canal es asistida por una estación central pero también puede ser realizada por los móviles de la red en su conjunto.

El objetivo del control de lazo cerrado es ajustar los niveles de potencia de tal forma que se alcance un valor de Relación de Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference Plus Noise Ratio*) como objetivo, haciendo el menor consumo de potencia posible. Existen dos métodos de control de potencia en lazo cerrado:

1.5.3 Control de Potencia centralizado (CPC, Centralized Power Control)

En este esquema la información de todos los móviles es compartida con la finalidad de calcular los nuevos valores de potencia, calculando una única SIR (*Signal to Interference Ratio*) para toda la red. Sin embargo este método tiene un gran inconveniente debido a la gran cantidad de información que debe manejar toda la red en tiempo real [17], además de alta complejidad de los algoritmos que requieren una gran capacidad de procesamiento, por lo que este esquema solo ha sido implementado en redes móviles celulares.

1.5.4 Control de Potencia Distribuido (DPC, Distributed Power Control)

Como su nombre lo indica, este método de PC solamente utiliza la información local para calcular los valores de potencia y SINR, por lo que no es necesario que una sola entidad se encargue del PC en toda la red. DPC utiliza una estructura con base en la teoría de control, lo cual tiene como ventajas la estabilidad [18] y la retroalimentación constante del canal.

1.6 CONTROL DE POTENCIA EN REDES VANET

En VANET el problema de PC no radica en el consumo de energía de los dispositivos pues cuentan con una fuente de energía constante proveniente del vehículo, el problema principal yace en reducir la interferencia producida por las transmisiones en una red con alta densidad de nodos [19], tal y como se puede visionar en la Figura 1.8. Igualmente una potencia insuficiente (ver Figura 1.9), podría interrumpir las comunicaciones.



Figura 1.8 Topología de congestión vehicular. Por los autores

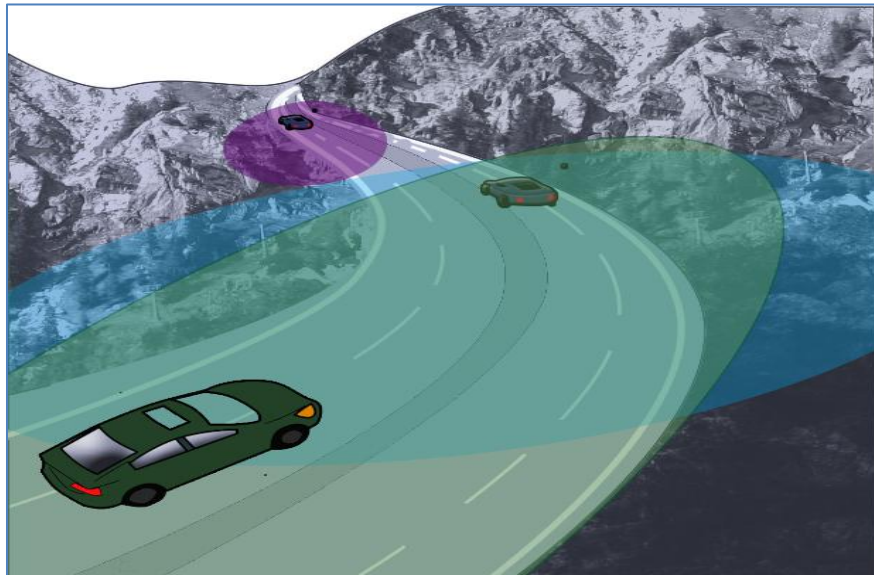


Figura 1.9 Topología vehicular dispersa. Por los autores

Aunque la rápida variación de la topología incide de manera negativa en los requerimientos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) [20], el estándar 802.11p no define un esquema específico para el PC como tampoco un algoritmo para la asignación efectiva de los canales [21]. Como se explica en [22], el PC afecta al desempeño de las capas físicas y de transporte, como también en la QoS de los servicios

desplegados, por lo que se ha investigado diferentes técnicas y algoritmos de PC que hasta el momento se han implementado en las redes inalámbricas.

1.6.1 Control de potencia en redes Ad-Hoc

A diferencia de otras redes inalámbricas, las redes Ad-Hoc no dependen de una infraestructura central para su funcionamiento ya que muchas de las tareas de control son repartidas entre los nodos [19], entre ellas el control de potencia. Dentro de los algoritmos y métodos estudiados se encuentran los siguientes:

1.6.1.1 COMPOW

Funciona en la capa de red, utiliza un mismo nivel de potencia para todos los nodos, es decir establece un mínimo nivel de potencia para el cual la red está conectada. A priori asume que la distribución de la red es homogénea, por lo que es ineficiente en redes heterogéneas [23].

1.6.1.2 CLUSTERPOW

Es un caso especial de COMPOW, diseñado para redes en las cuales los nodos no están esparcidos de forma homogénea. Utiliza agrupaciones de nodos llamados Clústers, para los cuales utiliza un nivel de potencia mínimo. Para llegar a otros clúster utiliza saltos de diferente potencia de transmisión, tal como se observa en la Figura 1.10. El algoritmo utiliza una mínima potencia para realizar múltiples saltos, el destino será alcanzable con potencias de transmisión que no superen la potencia mínima. Utiliza tablas de enrutamiento para almacenar los valores de potencia para cada salto [23]. La Figura 1.11 muestra un ejemplo de una tabla de enrutamiento en CLUSTERPOW.

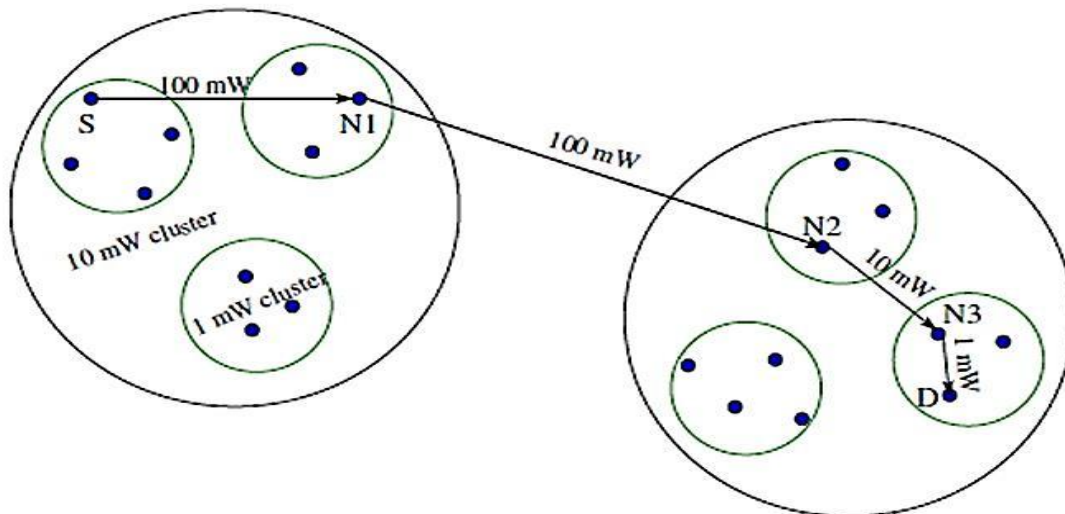


Figura 1.10 Topología de una red con CLUSTERPOW. Tomada de [23]



Kernel IP Routing Table

Dest	NextHop	Metric	TxPower
D	N3	2	10 mW

Node N2

Figura 1.11 Tabla de enrutamiento de CLUSTERPOW. Tomada de [23]

1.6.1.3 MINPOW

Este algoritmo opera de manera similar a CLUSTEPOW, la diferencia radica en que su objetivo principal no es el de maximizar la capacidad de la red si no el de optimizar el consumo batería. Estima costos de potencia para determinar las mejores rutas con ayuda del algoritmo Bellman-Ford. Posee la ventaja de que no depende de la capa física para esta tarea, aunque requiere el uso de dispositivos GPS para determinar las distancias entre el transmisor y el receptor [23].

1.6.1.4 Protocolo de control de potencia MCA

El Protocolo de control de potencia de Mínima Área de Cesado (MCA, *Minimum Cesased Area*) basado en el planteamiento de [24], busca hacer reúso espacial limitando el área de servicio de los nodos. Para esto calcula una potencia óptima la cual no sobrepasara la potencia máxima permitida pero será suficiente para superar el umbral de recepción [24]. En el apartado 1.6.4 se describe el funcionamiento detallado de este algoritmo.

1.6.1.5 Algoritmo CONECT

Es un algoritmo centralizado que tiene como objetivo realizar un control eficiente de la topología³ de la red mediante el ajuste de diferentes niveles de potencia. El algoritmo tiene como parámetro las coordenadas de todos los nodos de la red, el proceso da como resultado la topología de la red expresada mediante la teoría de grafos $G = (V, E)$ [25], donde V es el conjunto de vértices correspondiente a los nodos y E es el conjunto de ejes que representa las conexiones entre los nodos [25]. La Figura 1.12 muestra la comparación de una red Ad-Hoc sin control de topología frente a otra con un control de topología usando CONECT.

³ La finalidad del control de topología es incrementar la capacidad y disminuir el retardo “end to end” o punto a punto.

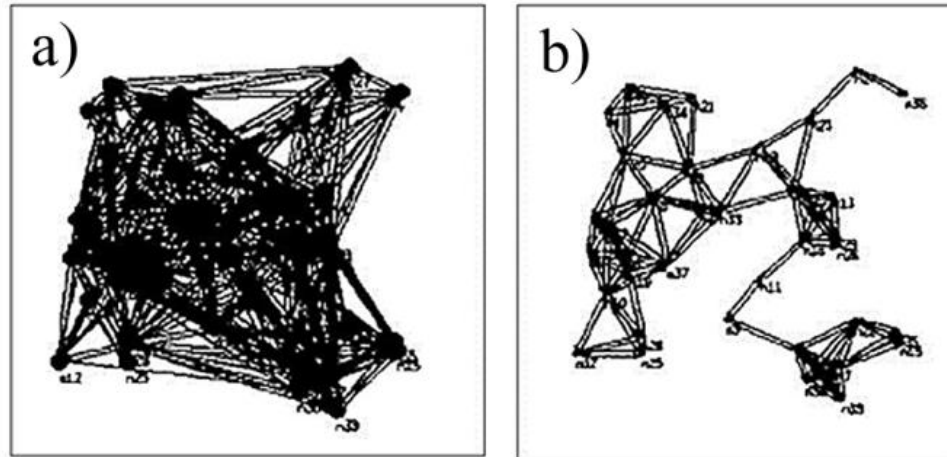


Figura 1.12 Comparación entre a) una red Ad-Hoc sin control de topología y b) una red Ad-Hoc Con control de topología. Tomada de [25]

1.6.1.6 Algoritmo BICONN-AUGMENT

Ideado para redes estáticas, funciona de manera similar al algoritmo CONECT, con la diferencia de que se asegura la conexión de los nodos en ambos sentidos de la red, procurando utilizar la mínima potencia para entablar la bi-conexión (conexión en ambos sentidos) [25].

1.6.2 Control de potencia en redes MANET

1.6.2.1 LINT

En el algoritmo de Información Local Sin Topología (LINT, *Local Information No Topology*), chequea periódicamente el número de nodos vecinos activos. Su objetivo es mantener un grado nodal deseado, el cual se fija como parámetro; posteriormente ajusta esa potencia de transmisión de acuerdo al grado nodal, es decir si el grado nodal es menor del grado deseado incrementa la potencia, si por el contrario el grado nodal sobrepasa al grado deseado reduce la potencia de transmisión [25]. LINT está diseñado para soportar el constante cambio de topología, sin embargo tiene la desventaja de establecer enlaces que no son bidireccionales.

1.6.3 Selección de Procedimientos de Control de Potencia

1.6.3.1 Criterios de Selección

Para definir qué procedimiento de PC es el más adecuado para ser implementado en una red VANET se definieron algunos criterios:

- a) Capacidad de adaptación al entorno VANET: el algoritmo debe responder rápidamente a los cambios de topología y a las variaciones de movilidad de la red, al igual que debe interactuar con las capas del estándar WAVE.



- b) Complejidad: se refiere a los procesos que están involucrados en el desarrollo del algoritmo y la dificultad para adaptar estos a un entorno VANET.
- c) Eficiencia: el algoritmo debe permitir el reúso espacial y optimizar el consumo de potencia.
- d) Nivel de Sobrecarga en la red: el algoritmo debe reducir en lo posible los mensajes para el control y la autenticación con el fin de no saturar el medio con información que no corresponda a la aplicación en sí.
- e) Robustez: a pesar de las condiciones del entorno, el algoritmo debe ser lo más estable en su funcionamiento, igualmente debe garantizar una menor probabilidad de caída de la comunicación, así como la conectividad de los nodos en ambos sentidos.

En la Tabla 1.4 se hace una comparación de los algoritmos descritos, con los criterios establecidos para la evaluación de estos:



Algoritmo/criterio	Capacidad de adaptación	Complejidad	Eficiencia	Nivel de sobre carga en la red	Robustez	Observación
COMPOW	MEDIA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	Requiere que la red tenga una distribución homogénea en todo momento
CLUSTERPOW	BAJA	ALTA	MEDIA	ALTA	MEDIA	Requiere protocolos y tablas de enrutamiento para escoger la mejor ruta
MINPOW	BAJA	ALTA	MEDIA	ALTA	MEDIA	Su enfoque es el ahorro de batería
MCA	ALTA	MEDIA	ALTA	BAJA	ALTA	Requiere la posición de los nodos
CONECT	BAJA	ALTA	MEDIA	ALTA	MEDIA	Dependiente de la posición de los nodos vecinos ya que debe reconstruir toda la topología de la red por cada cambio de ubicación. Es inestable en una topología dinámica.
BICONN-AUGMENT	BAJA	ALTA	MEDIA	ALTA	MEDIA	Permite establecer enlaces direccionales pero requiere de un control centralizado
LINT	ALTA	MEDIA	ALTA	BAJA	BAJA	Existe el riesgo de particionar la red, pues no garantiza enlaces bidireccionales entre nodos.

Tabla 1.4 Comparación de los algoritmos de PC. Por los autores



Tras realizar una comparación entre las características de cada algoritmo y algunas pruebas preliminares⁴, se determinó que el algoritmo MCA era el más apropiado para ser adaptado a una red VANET, pues no solo presenta una mayor eficiencia y robustez frente a las condiciones de alta movilidad sino que además permite un reajuste de los parámetros del algoritmo para responder más eficientemente a las pérdidas adicionales que pueda ofrecer el medio. Por otra parte no es indispensable utilizar protocolos y tablas de enrutamiento como sucede con CLUSTERPOW Y MINPOW, sin embargo si facilitan su funcionamiento en VANET. A continuación se realiza una descripción del funcionamiento del algoritmo MCA.

1.6.4 Descripción detallada del algoritmo de control de potencia MCA.

Este método propone la utilización de áreas de mínimo rango⁵ para lograr los siguientes propósitos (i) disminuir la interferencia, (ii) aumentar el grado de reuso espacial, (iii) mejorar el índice de reuso de frecuencias en la red y (iv) mejorar la capacidad de la red [24].

La lógica del algoritmo se desarrolla de esta manera: al tener una potencia baja, la interferencia se hace débil, y por lo tanto, se puede obtener un alto grado de reutilización espacial. Sin embargo la capacidad del canal puede verse reducida si la potencia de transmisión es muy baja [26], pues muchos paquetes no serán recibidos adecuadamente⁶.

Para su funcionamiento, el algoritmo depende de la distancia de separación entre un nodo y otro, pues este parámetro ayuda a escoger el método de cálculo más apropiado para hallar una potencia mínima con la cual los nodos obtienen una transmisión confiable.

Uno de los parámetros más importantes es la distancia de cruce d^* , que representa la distancia para la cual los modelos *Free Space* y *Two-ray ground* son equivalentes. Este parámetro se utiliza para escoger el modelo de pérdidas tal como se muestra en la ecuación (1.1):

$$d^* = H_t H_r * 4\pi / \lambda \quad (1.1)$$

Donde λ es la longitud de onda y H son las alturas de la antenas de transmisión y recepción. Dependiendo del resultado de d^* se decide entre los dos modelos

⁴ Las pruebas preliminares se realizaron con los algoritmos LINT y MCA, sin embargo al ver el particionamiento de enlaces que producía LINT en la red, se descarta y se toma finalmente el algoritmo MCA como el más apropiado.

⁵ Las áreas de mínimo rango son el equivalente a las áreas de servicio de los nodos, en la cuales es posible alcanzar un destino sin utilizar demasiada potencia y produciendo una menor interferencia como se detalla en [24].

⁶ Si la señal no es detectada adecuadamente o esta se recibe con muchos errores debido a los desvanecimientos por la propagación en el medio, entonces no se podrán establecer enlaces entre los nodos de la red lo que reduciría el número de transmisiones y por otro lado reduce las tasas de *throughput* en el destino.

representados en las ecuaciones (1.2) y (1.3). Si la distancia entre los nodos es mayor, entonces se elige el modelo en (1.2), por el contrario si la distancia entre los nodos es mayor o igual a la distancia de cruce se toma el modelo en (1.3).

Modelo de propagación de Espacio Libre

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1.2)$$

Modelo de propagación *Two-ray ground*

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r H_t^2 H_r^2}{d^4 L} \quad (1.3)$$

d : Distancia entre los nodos

L : Pérdidas básicas

H : Altura de las antenas

G : Ganancia de las antenas

Luego de escoger el modelo correspondiente, la potencia mínima de transmisión es despejada como se muestra en la ecuación (1.4), donde el umbral de recepción es $thrd_{rx}$ y se tiene un umbral de relación señal interferencia del efecto de captura SIR_{CAP} . Como se visualiza en la Figura 1.13, el parámetro SIR_{CAP} relaciona la existencia de un tercer nodo transmitiendo en el área de interferencia del primer emisor, en donde el nodo receptor solo recibe la señal más fuerte.

$$P_{min} = \begin{cases} \frac{thrd_{rx}(4\pi)^2 d^2 L}{G_t G_r \lambda^2}, & \text{si } d < d^* \\ \frac{thrd_{rx} d^4 L}{G_t G_r H_t^2 H_r^2}, & \text{si } d \geq d^* \end{cases} \quad (1.4)$$

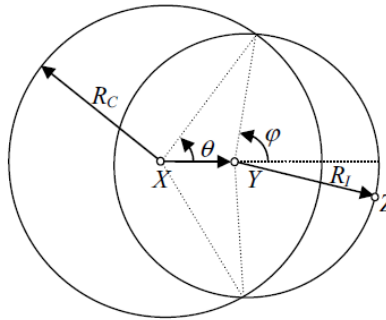


Figura 1.13 Interacción de los nodos en el área de interferencia. Tomada de [24]



El parámetro SIR_{CAP} se calcula de acuerdo a la ecuación (1.5), donde la potencia recibida por Y emitida por X se llamara P_r' y la potencia recibida por Y emitida por Z se llamara P_r'' (ver Figura 1.13). En la figura R_c es el radio del área de detección o de servicio del nodo X y R_l es el radio del área de interferencia producida por el nodo Z.

$$SIR_{CAP} = \frac{P_r'}{P_r''} \quad (1.5)$$

Posteriormente se calcula la potencia con la cual se obtiene un área mejorada menor al área inicial, donde se garantiza una correcta recepción de los paquetes entre los pares de nodos.

En la ecuación (1.6) se muestra el cálculo de la potencia óptima, donde d_{xy} es la distancia entre los nodos, P_t^* es la potencia de transmisión optimizada y $thrd_{CS}$ es el umbral de detección en el área del receptor por el cual se considera que la señal llega adecuadamente.

$$P_t^* = \begin{cases} \frac{4\pi d_{xy}}{\lambda} \left(\frac{P_{max} SIR_{CAP} thrd_{CS} L}{G_t G_r} \right)^{1/2}, & \text{si } d_{xy} < d^* \\ \frac{d_{xy}^2}{H_t H_r} \left(\frac{P_{max} SIR_{CAP} thrd_{CS} L}{G_t G_r} \right)^{1/2}, & \text{si } d_{xy} \geq d^* \end{cases} \quad (1.6)$$

Sin embargo existe una restricción en la potencia de transmisión, pues debe encontrarse en el rango $P_{min} \leq P_t \leq P_{max}$. Para prevenir que el P_t^* obtenido viole esta restricción, se ha definido la siguiente operación en (1.7):

$$P_{mca} = \min\{P_{max}, \max\{P_{min}, P_t^*\}\} \quad (1.7)$$

De esta manera la potencia P_{mca} por la cual se puede minimizar el Área de funcionamiento o de Cesado, se encontrará entre el rango $P_{min} \leq P_{mca} \leq P_{max}$. Al área obtenida se le llama área MCA. Dicho de otra manera, la potencia calculada siempre garantizará la conexión pues es igual o mayor a la potencia mínima, por otro lado nunca superara la potencia máxima permitida.

1.7 ASIGNACIÓN DE ESPECTRO EN REDES VANET

Como se había mencionado en los apartados 1.4.1.2 y 1.4.2.3, las redes VANET operan sobre 7 canales en la banda de los 5.9 GHz, de los cuales uno está destinado para control y el resto para datos de servicio. Sin embargo el estándar [23] no especifica cómo debe ser la asignación de los SCH para los equipos proveedores, por otro lado al carecer de una asignación que además sea eficiente en su distribución, por ejemplo y dado el caso de una congestión, uno de los canales de servicio puede sobrecargarse mientras los demás canales permanecen sin utilizar o poco aprovechados.



En el momento existen algunos trabajos como [26], [27] que buscan dar solución a este inconveniente como se describe a continuación.

1.7.1 Esquemas cooperativos de asignación de espectro en redes VANET

Entre las propuestas que se han elaborado para la asignación de espectro en redes VANET, se encuentra el Esquema Cooperativo para la Reservación del Canal de Servicio (CRASCH, *Cooperative Scheme for Service Channel Reservation*) el cual mediante el uso de mensajes WSA busca informar y recoger muestras acerca de los canales para seleccionar el SCH menos congestionado [26]. En [27] de manera similar cada vehículo recoge muestras del espectro durante un tiempo fijo, información que almacena en una base de datos y que después difunde a la red a través del canal de control, posteriormente cada vehículo decide el canal a seleccionar dependiendo del peso de las muestras.

Para que haya una asignación dinámica de los SCH es necesario conocer de antemano las condiciones de uso de cada uno, como se muestran en estos trabajos, sin embargo una de las dificultades que presentan es la excesiva sobrecarga en la cabecera como lo menciona [27]. Otro inconveniente es que no se consideran el envío de mensajes *Broadcast*⁷ a la red, lo cual hace que el algoritmo presente ineficiencias en su funcionamiento [26].

Es por eso que desde este trabajo se planteará un nuevo algoritmo de asignación de espectro que busque superar las anteriores dificultades y que pueda escoger de forma dinámica el SCH para cada vehículo. Este algoritmo será descrito con mayor detalle en el segundo capítulo.

1.8 CAPACIDAD EN REDES VANET

Para evaluar la capacidad a nivel de sistema en VANET, este trabajo se ha basado en [30], donde la capacidad de la red VANET es proporcional al máximo número de transmisiones simultáneas por unidad de longitud o máximo reuso espacial.

Se asume que el mecanismo para la Valoración de Canal Libre (CCA, *Clear Channel Assessment*), considera el canal como ocupado cuando un conjunto de señales interferentes $I(x)$ supera un umbral de recepción γ . Por otra parte se tiene una función de pérdidas $l(\cdot)$ que da la potencia de recepción de una señal en función de la distancia desde el transmisor. Esta función se encuentra en los \mathbb{R}^+ , es continua y decreciente con $l(0) > \gamma$. Para el $\lim_{u \rightarrow \infty} l(u) = 0$

⁷ Se refiere al envío de mensajes por difusión por toda la red.

La interferencia se modela únicamente con dos transmisores cercanos, uno a la derecha y otro hacia la izquierda como se muestra en la Figura 1.14, y se describe por la siguiente ecuación:

$$I(x) = l(x - Le) + l(Ri - x) \quad (1.8)$$

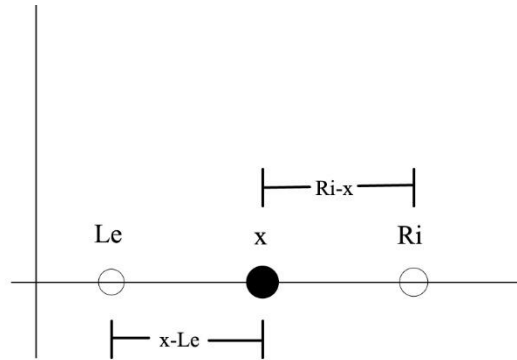


Figura 1.14 Modelo de interferencia entre nodos. Tomada de [30]

Un nodo en x podrá transmitir si y solo si se satisface la ecuación:

$$I(x) = l(x - Le) + l(Ri - x) < \gamma \quad (1.9)$$

Según [28], debe existir una distancia mínima D_{min} para la cual un nodo es capaz de realizar una transmisión entre dos nodos interferentes. Dicha distancia es solución de la ecuación (1.10):

$$2 \cdot l\left(\frac{D_{min}}{2}\right) = \gamma \quad (1.10)$$

Para continuar, se considera que los nodos se encuentran en un intervalo $[0, L]$, donde L es el largo de la carretera y por tanto este modelo propuesto en [28] busca representar el máximo número de transmisores en dicho intervalo. Se denota $m(L)$ como la media de transmisores simultáneos en una carretera de largo L , dicho valor se puede estimar con la siguiente proposición en (1.11):

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{m(L)}{L} = \lambda, \lambda \in \mathbb{R}^+. \quad (1.11)$$

De otra manera se tiene $m(L) = \lambda L$, con este resultado la capacidad puede obtenerse como:

$$C(L) = \lambda L / T \quad (1.12)$$

En la ecuación 1.12 T representa el tiempo medio para transmitir una trama, donde se incluye el tiempo para transmitir la trama, el SIFS, DIFS y el tiempo de ACK. Esta



capacidad definida en la ecuación 1.12 representa el número de tramas enviadas por segundo a la red, además es directamente proporcional al número transmisiones simultáneas, es decir, a un mayor número de nodos que transmiten en un mismo espacio de tiempo, mayor es la cantidad de información que puede enviarse a la red.

La estimación de la constante λ se hace directamente de la función de pérdidas como indica la siguiente ecuación:

$$l(u) = P_t \min\left(\beta, \frac{\beta}{u^\alpha}\right) \quad (1.13)$$

Donde β es el parámetro de referencia de pérdida igual a -46.6dB, P_t es la potencia de transmisión, u es la variable que representa la unidad de longitud y α es el coeficiente de pérdidas. En [28] la constante se obtiene como resultado de graficar $\frac{m(L) \cdot D_{min}}{L}$ v/s $L(Km)$, dando como resultado:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{m(L)}{L} = \lambda \approx \frac{c}{D_{min}}, c = 1.49 \quad (1.14)$$

Nuevamente esta capacidad teórica puede calcularse de la siguiente manera:

$$C(L) = \frac{cL}{D_{min}T} = \frac{1.49L}{D_{min}T} \quad (1.15)$$

Por otra parte el número de transmisores simultáneos puede calcularse de una manera aproximada con:

$$m(L) = \lambda L \approx \frac{1.49L}{D_{min}} \quad (1.16)$$

La ecuación 1.15 está relacionada con el *throughput*⁸ total de la red, sin embargo para el estudio desarrollado en este trabajo de grado, la capacidad⁹ estará relacionada con el número de transmisiones simultáneas que se puedan lograr en una red, tal como lo relaciona la ecuación (1.16).

⁸ *Throughput* se traduce como Rendimiento, pero el concepto debe entenderse como la tasa de bits que llega correctamente sobre un canal de comunicación.

⁹ La Capacidad de una red se ha definido como la máxima cantidad de nodos o usuarios que pueden ser atendidos por la red, con una distribución equitativa de los RR, sin deteriorar la QoS para cada uno de ellos.



CAPITULO 2

MODELADO DE UNA RED VANET E IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO Y CONTROL DE POTENCIA

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de este proyecto se ha adaptado la siguiente metodología de simulación llamada “Metodología de simulación-Perspectiva de un profesional” referido en [29]; la cual se compone de las siguientes fases:

- **Fase 1:** Definición del problema.
- **Fase 2:** Diseño del estudio.
- **Fase 3:** Diseño del modelo conceptual.
- **Fase 4:** Formulación de variables y definición de procesos.
- **Fase 5:** Construcción y validación del modelo.
- **Fase 6:** Experimentación con el modelo.
- **Fase 7:** Documentación y presentación de resultados.

2.2 FASE 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En esta fase se definen los objetivos, las especificaciones y la delimitación del estudio en este trabajo de grado.

2.2.1 Objetivo del estudio

Los objetivos planteados para la construcción del modelo de simulación y el desarrollo de la experimentación son:

- Estudio del comportamiento de una red vehicular basada en los estándares WAVE/802.11p mediante una simulación en la cual se pueda apreciar el movimiento de los vehículos a través de una carretera y el intercambio de mensajes entre los mismos.



- Análisis de la capacidad de una VANET y evaluación del impacto que puede generar sobre la misma la implementación de procedimientos de asignación de espectro y control de potencia.

2.2.2 Especificaciones

Para este trabajo de grado se requiere la implementación de un modelo con las siguientes especificaciones:

- El modelo debe incluir la movilidad vehicular dentro el proceso de simulación.
- El modelo debe permitir el intercambio y procesamiento de mensajes entre los nodos.
- El modelo debe incluir el modelado del canal de radio.
- El modelo debe implementar MCA y NACSA como procedimientos de control de potencia y asignación de espectro respectivamente.
- El modelo debe permitir el análisis de la capacidad de la red, la variación de la potencia de transmisión y medir la congestión de los canales, mediante el despliegue de resultados numéricos y gráficas.

2.2.3 Delimitación del estudio

Debido a las limitaciones ofrecidas por las herramientas de simulación de redes VANET de las cuales se habla en 2.3.4, el estudio tiene las siguientes limitaciones.

- Se realizara únicamente sobre el dominio Ad-Hoc, lo anterior implica que el desarrollo de las simulaciones se centrará en torno al desenvolvimiento de las comunicaciones V2V y la interacción de los elementos de comunicación dentro del dominio en el vehículo como son las capas física, MAC y de aplicación.
- El funcionamiento de las capas superiores se limitan al protocolo WSMP, por lo que el uso de IP, a pesar de estar definido en el estándar WAVE, queda excluido de las simulaciones.
- El estudio se limita a cuatro canales de servicio, por lo cual los canales 172 y 184 reservados específicamente para seguridad crítica se omiten.
- La potencia de recepción del modelado del canal radio mostrada en la ecuación (2.1), se limita al modelo de espacio libre modificado definido en [30] y en [31], donde α es el exponente de pérdidas por distancia, el cual varía dependiendo del entorno de simulación.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^{\alpha} L} \quad (2.1)$$



2.3 FASE 2: DISEÑO DEL ESTUDIO

En esta fase se define qué elementos del sistema real serán incluidos o excluidos (según su relevancia) dentro del modelo, el nivel de detalle con que cada elemento del sistema ha de ser descrito (ya sea moderado o muy detallado) dependiendo de las especificaciones del sistema.

Por otra parte se define el número de modelos a trabajar dentro del desarrollo del trabajo de grado, los supuestos generales y la escogencia de la herramienta (o el conjunto de herramientas) de simulación para llevar a cabo el estudio.

2.3.1 Supuestos Generales

- La capacidad puede entenderse como el número de vehículos que pueden ser atendidos en la red.
- La capacidad puede analizarse con el número de transmisiones simultáneas que pueda ofrecer la red sin degradar la QoS.
- Dos o más nodos cercanos que transmitan con potencias altas, de tal forma que se escuchen mutuamente, no pueden transmitir al mismo tiempo a menos que lo hagan con una frecuencia distinta, ya que cuando un nodo transmite, los demás entran en *backoff*.
- Se considera una transmisión simultánea como número de vehículos que puedan transmitir sobre un intervalo de tiempo muy pequeño.
- Seleccionar aleatoriamente un canal para realizar las transmisiones de datos puede llevar a la sobrecarga de un canal en específico, mientras que los demás canales podrían desaprovecharse.
- Los procedimientos de control de potencia pueden ayudar a mitigar el impacto de las colisiones y reducción en los tiempos de *backoff*, ya que al usarse áreas de servicio más pequeñas se reduce la interferencia (reúso espacial).
- El uso de procedimientos de control de espectro puede mejorar la distribución de los canales de radio al hacerla lo más equitativa posible.

2.3.2 Modelos requeridos

- Un modelo denominado VANET el cual representa el funcionamiento básico de una red vehicular definido según los estándares WAVE y 802.11p, el cual sirve como referencia para el análisis de la capacidad.



- Un modelo denominado VANET SA/PC el cual representa el funcionamiento de una red vehicular que implementa procedimientos de Asignación de Espectro (SA, *Spectrum Allocation*) y control de potencia con el cual se pretende mejorar la capacidad.

2.3.3 Requerimientos de Animación

- Un vehículo es representado por un ovalo cuyo color representa el canal de servicio por el cual se está enviando la información.
- La animación debe mostrar el desplazamiento de los vehículos a través de una carretera.
- La animación debe permitir la visualización del envío de mensajes.

2.3.4 Selección de la Herramienta de simulación

Teniendo en cuenta el enfoque de este trabajo de grado la herramienta de simulación debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- **Integración con modelos de movilidad:** Permitir fácil integración con simuladores de tráfico vehicular.
- **Modelado del canal de radio:** Ofrecer modelos detallados de radio propagación así como de estimación de la interferencia.
- **Integración con los estándares WAVE/802.11p:** Permitir la creación de un modelo de red VANET, de acuerdo a los estándares WAVE/802.11p.
- **Código Abierto:** Permitir acceso al código fuente, permitiendo la implementación de los algoritmos y procedimientos previamente estudiados, así como la modificación de los estándares ya establecidos.
- **Documentación:** Contar con una vasta documentación permitiendo una rápida curva de aprendizaje.

Existen varias herramientas de simulación para redes Vehiculares, como se puede apreciar en [32], de las cuales se destacan TraNS y VEINS. Teniendo en cuenta los criterios de selección ya establecidos, la herramienta que mejor se adapta a las necesidades de este trabajo de grado es VEINS. El Anexo A muestra la instalación de VEINS y la integración con SUMO y OMNET++.

2.3.4.1 VEINS

VEINS es un *framework* de código abierto usado para la simulación de redes vehiculares, este se establece sobre la integración dos simuladores, OMNET++ como simulador de red y SUMO como simulador de movilidad [33].

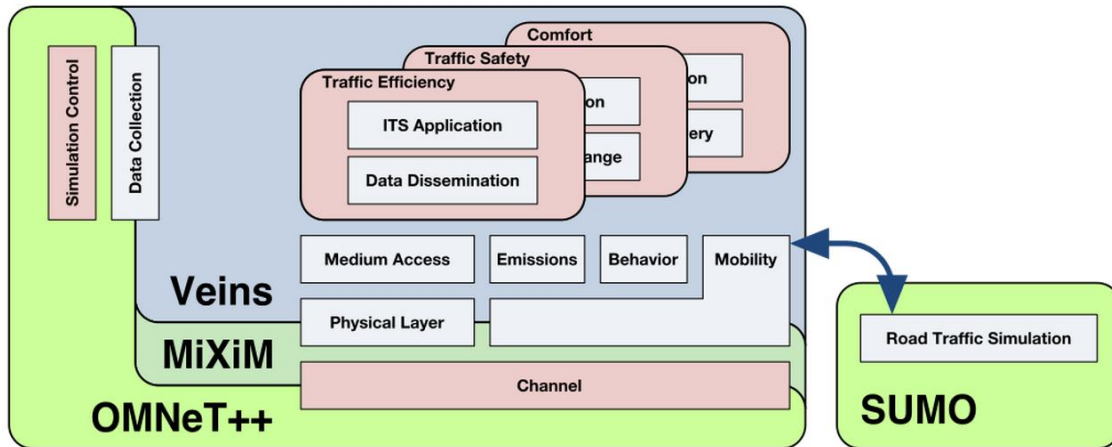


Figura 2.1 Arquitectura VEINS. Tomada de [33]

En Figura 2.1 se puede apreciar la arquitectura VEINS en la cual se pueden apreciar los siguientes componentes:

2.3.4.2 OMNET++

OMNET++ es un simulador de eventos. Contiene una estructura modular, en donde cada módulo esta codificado en C++ y se comunica con los demás módulos mediante mensajes. En OMNET++ un módulo puede representar un host en la red, una tarjeta de red, un protocolo, una capa de la arquitectura TCP/IP, entre otros [33].

2.3.4.3 MIXIM

MIXIM es una extensión de OMNET++ creada especialmente para la simulación de redes inalámbricas. El comportamiento del canal de radio es muy importante en la simulación de redes inalámbricas, teniendo en cuenta esto MIXIM incorpora algunos modelos de propagación como *simple path loss*, *multipath* y *shadow fading* [34].

2.3.4.4 SUMO

El simulador de movilidad urbana (SUMO, *Simulation Urban MObility*) es un simulador de ingeniería de tráfico vehicular, este se comunica con OMNET++ mediante un módulo denominado TraCI.



2.3.5 Datos disponibles y datos necesarios

Para poder efectuar el estudio correspondiente, se han definido los datos y variables correspondientes como se muestra en la Tabla 2.1:

DATOS REQUERIDOS	GRAFICAS NECESARIAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD.
<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de la red • Número de usuarios • Número de proveedores. • Coordenadas de cada vehículo • Dirección MAC de cada vehículo • Tiempo de simulación • Frecuencia portadora • Número de canales • Frecuencias de cada canal • Potencia mínima de transmisión • Potencia máxima de transmisión • Sensibilidad de las tarjetas de red • Tamaño de los mensajes. • Periodo de envío de mensajes WSA • Intervalo de transmisiones simultaneas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de transmisiones simultáneas en la red. • Uso de cada canal. • Variación de la potencia de transmisión por cada nodo. • <i>Throughput</i> promedio. • Pérdida de paquetes por nodo.

Tabla 2.1 Datos disponibles y datos necesarios. Por los autores

2.4 FASE 3: DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL

Para esta fase se diseñó una estrategia de modelado del sistema, que involucra la toma de decisiones con respecto a cómo un sistema debe estar representado en términos de las capacidades y los elementos proporcionados por la herramienta de simulación elegida. Esta estrategia permitió garantizar el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado.

2.4.1 Identificación de los elementos dinámicos del sistema

El vehículo inicia y provoca los cambios dentro del sistema, pues es quien está modificando los parámetros y resultados de simulación a medida que se mueve dentro de la red. Los elementos dinámicos identificados son los siguientes:

- **Vehículo proveedor:** Es quien inicia la comunicación.
- **Vehículo Usuario:** Es aquel quien acepta unirse a la comunicación.

2.4.2 Componentes del sistema

En este apartado se definen los componentes que se requieren a nivel general para la construcción del modelo, tal y como se muestra en la Figura 2.2. Dichos componentes

contienen a su vez otros subcomponentes, los cuales poseen funciones y tareas específicas que permiten el funcionamiento del sistema:



Figura 2.2 Componentes del sistema. Por los Autores

Escenario: Este elemento contiene las condiciones y parámetros iniciales donde se desenvuelve la comunicación. Entre esos parámetros se encuentran obstáculos, cantidad de vehículos, tamaño y ubicación de los mapas, tiempos de simulación, tamaño de los paquetes entre otros.

Vehículos: Actores principales de la red, estos inician la comunicaciones y están en constante movimiento. Este contiene a la Tarjeta de Interfaz de Red (NIC, *Network Interface Card*) y la AU.

AU: Como un sub-módulo del vehículo, se encarga de manejar el nivel de aplicación en el vehículo, el envío de mensajes WSA y WSM, la inicialización de los servicios, la asignación de prioridades del paquete y la selección del SCH por parte del vehículo. Este sub-módulo cuenta a su vez con los siguientes elementos:

- **Mensajes WSM:** Son mensajes a nivel de aplicación utilizados para el intercambio de información entre los vehículos en la red. A los campos de este mensaje que están especificados en la tabla 1.2 del capítulo anterior, se le suman los campos SCH y LastSCH. El campo SCH tiene información acerca del SCH que está manejando el proveedor de un servicio, el campo LastSCH es usado para la actualización con los otros vehículos en la red, la información que contiene hace referencia al SCH que se usaba el vehículo antes de hacer un cambio de canal.
- **Mensajes WSA:** Mensajes usados entre los vehículos para anunciar y establecer un servicio. Los campos de este mensaje están especificados en la tabla 1.3 del capítulo anterior.



NIC: Este sub-módulo de la entidad vehículo, es indispensable para realizar las comunicaciones inalámbricas trabajando a nivel Físico y a nivel MAC. Para el correcto funcionamiento en el modelo de simulación, se han abstraído los siguientes elementos que pertenecen e interactúan en este sub-módulo:

- **Nivel Físico:** En este nivel se hace la preparación, envío y recepción de las señales enviadas por los vehículos, además de procesar previamente los paquetes que vienen desde y hacia la capa MAC. Un componente importante de este elemento es el decisor, quien califica las señales que llegan al receptor dependiendo de su estado, ya sea como paquete recibido, ruido, señal por debajo del umbral de recepción o como colisión.
- **Nivel MAC:** En este nivel se procesan las tramas, se implementa CSMA/CA para el acceso al canal y se implementa EDCA para la diferenciación de servicio y aplicar prioridades de procesamiento a los paquetes que van y llegan de las capas superiores. También se asigna la dirección MAC del vehículo y se procesan las direcciones que sean *Broadcast* o *Unicast*.
- **Trama 11p:** Contiene la información útil de los mensajes de las capas superiores y la información de control para trabajar a nivel MAC.

Módulo de movilidad: Este sub-módulo del vehículo, dentro del modelo, es el encargado de que el vehículo ajuste su comportamiento de acuerdo a un determinado modelo de movilidad. Por otro lado se encarga de manejar la velocidad, aceleración y posición del vehículo durante los procesos de simulación.

Canal Radio: Representado por las atenuaciones y sus características dispersivas en el tiempo y en frecuencia. En este caso el comportamiento del canal estará basado en el modelo de propagación a utilizar.

- **Señal de Transmisión:** Es la forma de enviar la información en una onda electromagnética a través del medio físico. La señal contiene además información como la potencia de transmisión, la frecuencia de trabajo y la duración de esta en el tiempo.

2.4.3 Colección de estadísticas y Resultados

Para la recolección de estadísticas y resultados de las simulaciones, el modelo debe contar con la medición de vectores, contadores y despliegue de gráficos para mostrar los resultados de la simulación. Adicionalmente la herramienta de simulación debe permitir sacar promedios estadísticos para el análisis de los resultados. Entre las estadísticas y datos a recolectar están los siguientes:



- **Throughput v/s Tiempo:** Es un vector que recolecta la medida de *throughput* en cada instante de tiempo, para esto se diseñará o adaptará un modelo independiente capaz de realizar las medidas entre la capa MAC y la capa de Aplicación.
- **Potencia de Transmisión v/s Tiempo:** Este vector se encarga de medir la variación y los ajustes de la potencia en cada uno de los nodos a través de la simulación.
- **Porcentaje de pérdida de paquetes:** Registra la totalidad de paquetes perdidos por diferentes motivos durante el proceso de simulación mediante la razón entre el total de paquetes perdidos sobre la totalidad de paquetes recibidos.
- **Cantidad de uso de un SCH:** Este escalar contabiliza el número de veces en el que un determinado nodo utiliza un SCH determinado.
- **Utilización de los canales en el tiempo:** Este vector muestra los cambios de canal en cada nodo durante el proceso de simulación.
- **Latencia promedio:** Mide el retardo promedio punto a punto en cada nodo.
- **Número de transmisiones simultáneas:** Definido como un vector, se encarga de contabilizar el número de nodos que transmiten simultáneamente en un instante (o intervalo muy pequeño) de tiempo.

2.5 FASE 4: FORMULACIÓN DE VARIABLES, SUPOSICIONES Y DEFINICIÓN DE PROCESOS

2.5.1 Acceso al servicio e intercambio de datos en una red VANET

La NIC de cada nodo soporta los procesos de operación multicanal y conmutación de canal, lo que significa que cada 50ms se conmuta entre CCH y SCH como se había mencionado en [12], CCH hace referencia al canal 178, mientras que SCH puede ser cualquiera de los canales de servicio especificados en la Tabla 2.2.

CANAL	NUMERO	FRECUENCIA (GHz)
CCH	178	5.89
SCH1	174	5.87
SCH2	176	5.88
SCH3	180	5.90
SCH4	182	5.91

Tabla 2.2 Canal de control y canales de servicio. Por los autores

En el primer intervalo de conmutación de los canales, el transceptor se comunica a través CCH, este intervalo es usado para el envío de mensajes de control en modo *Broadcast*, y



con la máxima potencia. En el segundo intervalo se envían los mensajes de datos correspondientes a los diferentes servicios, los cuales se envían mediante SCH.

Los modelos VANET y VANET SA/PC hacen referencia a una red vehicular en la cual los nodos establecen comunicaciones a través de mensajes WSM. En la red se pueden identificar dos roles, el proveedor y el usuario.

El establecimiento de las comunicaciones entre proveedores y usuarios se hace a través de mensajes WSA. Los proveedores envían periódicamente mensajes WSA para anunciar su servicio a los demás nodos. Cada mensaje WSA contiene información acerca del servicio y el SCH asociado por el cual se despliega. Cuando un usuario decide unirse envía un mensaje de suscripción JOIN al proveedor que desea suscribirse y se inicia el intercambio de datos a través de mensajes WSM. El proceso de establecimiento de comunicación se puede observar en la Figura 2.3.

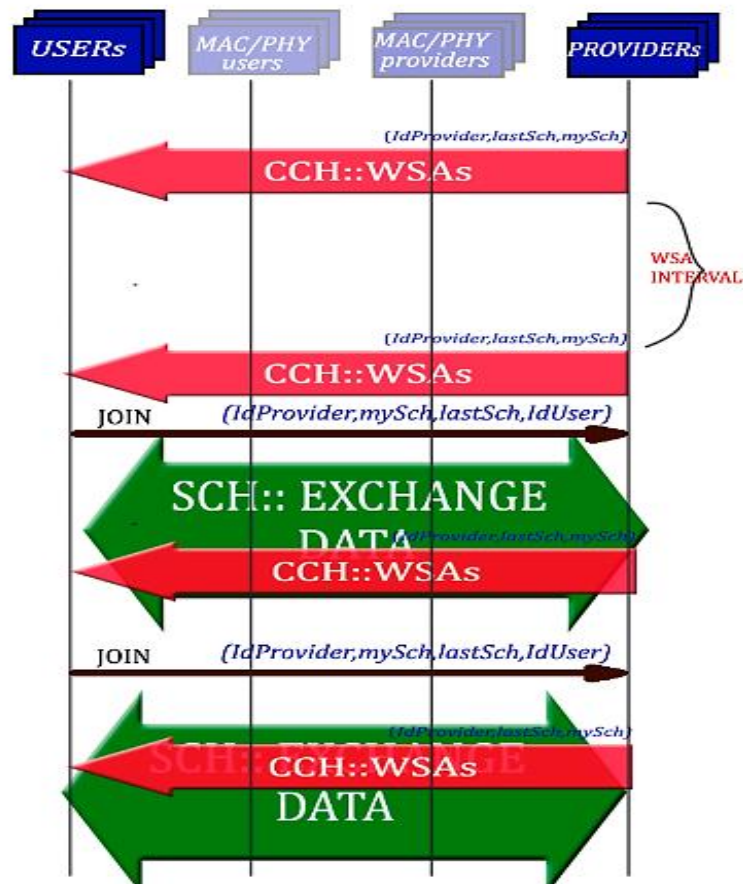


Figura 2.3 Acceso al servicio e Intercambio de paquetes. Por los autores

Cada usuario dispone de un registro donde almacena la información de todos los proveedores de la red y el servicio ofrecido. La Tabla 2.3 da un ejemplo del registro de proveedores; la tabla se actualiza con la llegada de cada mensaje WSA.



Proveedor Id	Servicio
0	Advertencias de Seguridad
1	Control tráfico
2	Grupo Comunicaciones
3	Advertencias de Seguridad
5	Advertencias de Seguridad

Tabla 2.3 Registro de proveedores. Por los autores

De manera similar cada proveedor posee un registro que contiene a los usuarios suscritos al servicio ofrecido. Cada nodo dispone de un registro que contiene la información de los nodos vecinos en la red. El registro contiene los campos id del nodo y el canal de servicio. La Tabla 2.4 da un ejemplo del registro de nodos donde el valor 1 significa que el nodo está usando el determinado SCH y el valor 0 significa que el nodo no está haciendo uso del SCH. El registro se actualiza con los diferentes mensajes de control, WSA, JOIN y DISJOIN.

Id	SCH1	SCH2	SCH3	SCH4
0	1	0	0	0
1	0	1	1	0
2	0	0	0	1
3	1	0	0	0
4	0	1	0	0
5	0	0	0	1
6	1	0	0	0

Tabla 2.4 Registro de Nodos. Por los autores

La potencia de transmisión y la frecuencia se fijan por cada intercambio de datos entre el usuario y el proveedor, para ello se hace uso de los campos CHANNEL y POWER definidos tanto en los mensajes de control, como en los mensajes WSM.

En el modelo VANET cada nodo selecciona un canal de servicio aleatoriamente al inicio de la simulación y lo mantiene hasta la finalización de la misma, cada mensaje se envía con la potencia máxima; en el modelo VANET SA/PC los mensajes de control se transmiten con la potencia máxima, los canales de servicio y la potencia de transmisión se ajustan dinámicamente a lo largo de la simulación.

2.5.2 Adaptación del algoritmo MCA

Para el funcionamiento de este algoritmo es necesario obtener las coordenadas tanto del emisor como del trasmisor, así como definir los parámetros establecidos previamente en la Tabla 2.5 antes de la ejecución del algoritmo, e igualmente debe tenerse en cuenta que



el algoritmo no ha sido originalmente diseñado teniendo en cuenta la movilidad de una red VANET, aunque cuenta con la ventaja de conocer mediante los mensajes WSM la ubicación aproximada de los nodos.

Los parámetros consignados en la Tabla 2.5 que son utilizados para el diseño, la implementación y la experimentación, están basados en los trabajos de [30] y [35] que han operado sobre ambientes reales de ejecución y cuenta con las características del hardware de las tarjetas inalámbricas utilizadas para la comunicación V2V [30].

Potencia de transmisión Máxima	18 dBm
Ganancia de las antenas	0 dBi
Frecuencia central de trabajo	5890 MHz
Altura de las antenas	1.895m
Umbral de Recepción	-83 dBm
Umbral de Detección	-89 dBm
SIR de Captura	15 dB
Perdidas adicionales	30 dB

Tabla 2.5 Parámetros de Funcionamiento de MCA. Por los autores

Para mejorar la recepción de paquetes y reducir la posibilidad de pérdida por baja potencia durante la comunicación V2V, se establece el parámetro Thr_x (umbral de recepción) para una distancia de recepción adecuada igual a 500m (en VANET el alcance máximo está establecido para 1km aproximadamente). De esta manera en la ecuación 2.2 y la ecuación 2.3 se obtiene:

$$Thr_x(dBm) = 18dBm - 32.45 - 20 \log(5890MHz) - 20 \log(0.5km) \quad (2.2)$$

$$Thr_x(dBm) \approx -83dBm \quad (2.3)$$

El parámetro de pérdidas adicionales permite compensar las pérdidas que pueden presentarse durante el recorrido del vehículo, entre ellas la multi-trayectoria, por lo que este valor puede ser ajustado según el diseño de la implementación. Por otra parte en [36] se estima que los desvanecimientos por multi-trayectoria pueden llegar a estar entre los 20 y 30dB, por lo que se ha optado tomar el valor de 30dB para la implementación del algoritmo.

En la Figura 2.4 se puede visualizar el proceso que debe ejecutar el algoritmo para calcular la potencia una potencia óptima de transmisión. El proceso se describe de la siguiente forma:

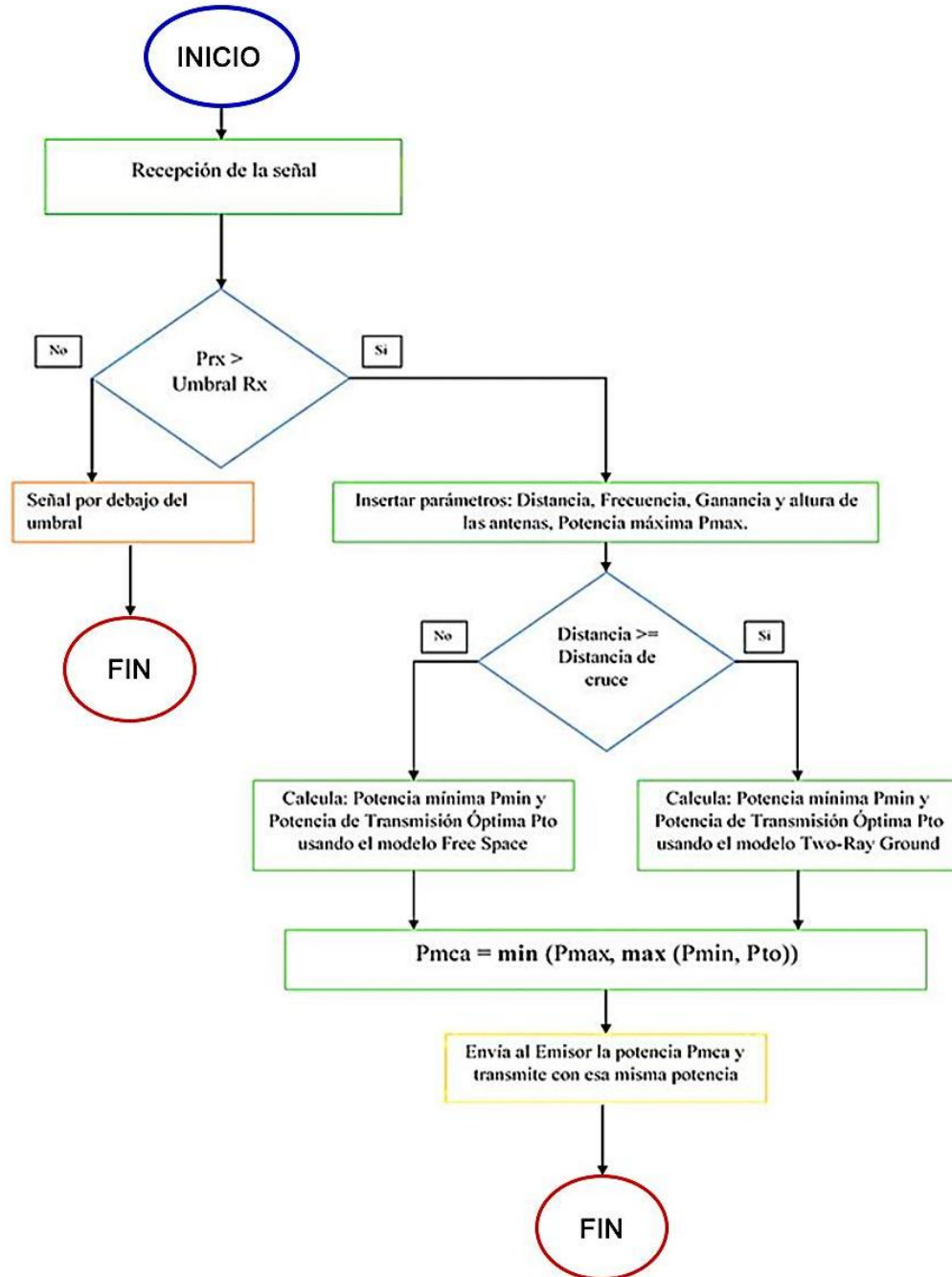


Figura 2.4 Diagrama de flujo del algoritmo MCA. Por los autores

1. El nodo que inicie la comunicación transmitirá con una potencia por defecto,
2. Tras recibir un paquete, el nodo receptor realizará el respectivo tratamiento de la señal y el paquete contenido, evaluará si sobrepasa los umbrales de recepción y de SINR para descartar si se trata de una señal de baja potencia o una señal de ruido.



3. El nodo receptor, en este caso el usuario, extraerá del mensaje tanto las coordenadas de latitud y longitud, así como el SCH del emisor.
4. Se evalúa la distancia de cruce y se compara con la distancia entre los nodos.
5. Tras evaluar la distancia de cruce, el algoritmo decide el modelo más adecuado para calcular la potencia óptima de transmisión.
6. Se adjunta la potencia óptima dentro del mensaje de respuesta, el cual se transmite con la potencia óptima.
7. Luego de recibir el mensaje, el nodo que inicio el proceso de comunicación, en este caso el proveedor, fija esa nueva potencia dentro de sus nuevos mensajes.
8. El algoritmo se ejecutará en cada nuevo mensaje recibido por el nodo usuario, hasta que la comunicación se termine.
9. Una vez se termine la comunicación los nodos tomarán de nuevo la potencia de transmisión por defecto para iniciar una nueva comunicación.

De esta manera se realizará un reuso espacial que disminuye en cierto grado la interferencia con otros nodos cercanos dentro de la red.

Una singularidad de este algoritmo es que solamente puede implementarse en VANET para enlaces punto a punto. Para enlaces multi-salto este algoritmo debe ir acompañado con protocolos de enrutamiento, por otra parte, este caso de estudio queda excluido dentro del desarrollo del trabajo de grado y queda pospuesto para estudios futuros.

Para adaptar el algoritmo, se modifica la lógica de ejecución y funcionamiento como se muestra en la Figura 2.5, donde el nodo proveedor enviará dentro de un WSA la posición y la información del servicio, posteriormente si el nodo decide unirse en la comunicación este envía un WSA de confirmación.

Como se aprecia en la Figura 2.5, únicamente se realiza el PC durante el intercambio de datos entre los vehículos, además es el usuario quien ejecuta el algoritmo mientras que el proveedor tan solo ajusta la potencia que le llega dentro del mensaje WSM. La razón de que este proceso se ejecute de esta manera tiene que ver con que mientras el usuario solo mantiene una comunicación con un solo proveedor, el proveedor puede mantener varias comunicaciones con diferentes usuarios dentro de la red, por lo que el calcular diferentes potencias para cada usuario resulta una extenuante tarea que consume recursos y tiempo para un único nodo. Si es solo el usuario quien ejecuta el algoritmo, solo debe calcular la potencia para un único nodo, distribuyendo así el consumo de memoria entre los nodos que habitan en la red o estén suscritos al servicio que ofrece el nodo proveedor.

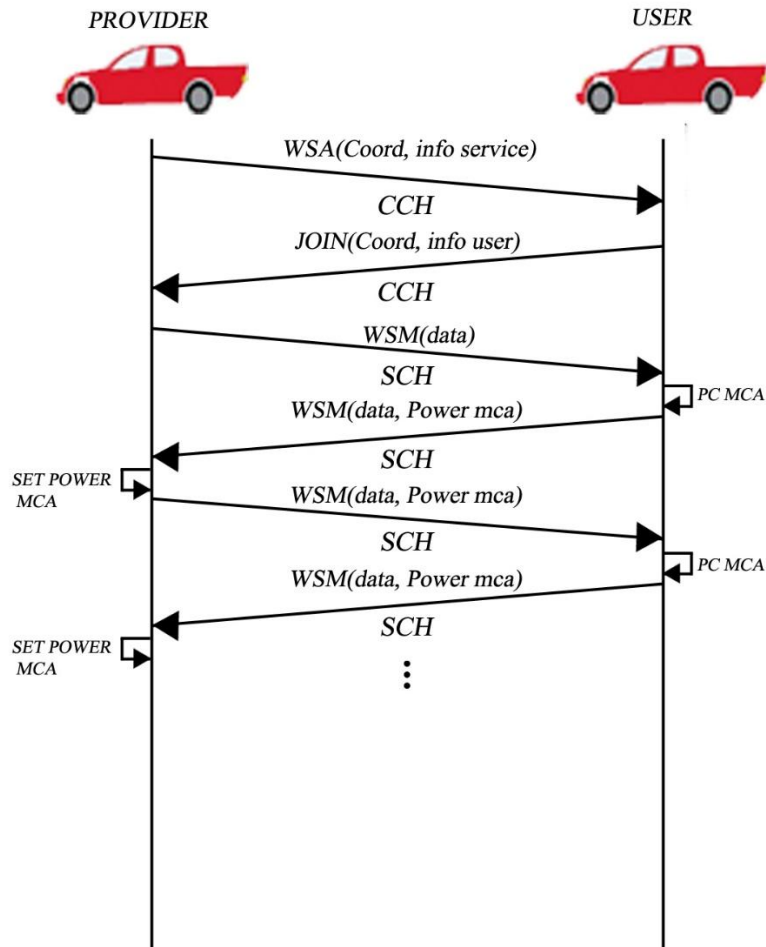


Figura 2.5 Ejecución del Algoritmo MCA. Por los autores

2.5.3 Nuevo Algoritmo de Asignación de Espectro Cooperativo

El Nuevo Algoritmo de Asignación de Espectro Cooperativo (NACSA, *New Algorithm for Cooperative Spectrum Allocation*) propuesto por los autores durante la fase de desarrollo del proyecto, busca resolver el problema de asignación de los canales de servicio para VANET, por lo cual se han planteado las siguientes pautas que determinarán el funcionamiento de dicho algoritmo:

- Los nodos que sean proveedores y deseen iniciar un servicio deben enviar mensajes de control *Broadcast* en la red por el CCH, especificando el canal de servicio por el cual están operando.
- Cada nodo tendrá una matriz, la cual contiene la información acerca de los nodos vecinos, y su canal de servicio.
- Cada nodo escucha los mensajes de control por CCH, luego utiliza esta información para actualizar su matriz.



- d) El algoritmo debe determinar cuál es el canal menos ocupado para ese nodo, luego de escoger el canal debe anunciarlo a sus vecinos para que actualicen sus matrices.
- e) Cuando un nodo decide terminar su servicio o cuando un usuario decide terminar la comunicación, envía otro mensaje *Broadcast* a los nodos cercanos para que sea des-registrado.
- f) El algoritmo debe emplear los campos establecidos en el estándar para enviar la información requerida, y en tal caso añadir los que sean necesarios para su funcionamiento.

2.5.3.1 Definición de la matriz base para el algoritmo.

Se tiene una matriz $M = (m_{ij})$ de tamaño $m \times n$ donde m es el número de nodos cercanos y n el número de canales de servicio a disposición. La componente m_{ij} representa el canal de servicio usado por cada usuario, tal y como se muestra en la ecuación 2.4:

$$m_{ij} \begin{cases} 1 & \text{si } sch = j \\ 0 & \text{si } sch \neq j \end{cases} \quad (2.4)$$

Para determinar cuál es el canal con mejor disponibilidad se define un vector contador $C = \{c_1, c_2 \dots c_j \dots c_n\}$, donde c_j es el número de usuarios que usan el canal j . La variable c_j se obtiene de M como describe la ecuación 2.5:

$$c_j = \sum_{i=0}^n m_{ij} \quad (2.5)$$

2.5.3.2 Procedimiento para la escogencia del canal

Está claro que el uso de una matriz no es suficiente para asignar el canal eficientemente, por lo que es necesaria la coordinación y cooperación entre los nodos presentes en la red, además se debe cambiar el canal dinámicamente cuando su propio canal se vea en algún momento muy congestionado.

Para realizar el cambio de canal se ha definido un funcionamiento especial como se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 2.6, donde el nodo toma en cuenta no solo la cantidad de proveedores en un SCH, sino que además considera la cantidad de usuarios presentes en cada canal y el estado de congestión del canal propio.

El proceso NACSA verifica el estado del canal menos congestionado a partir de la matriz M y lo compara con el suyo, haciendo una predicción de cuanto estará congestionado ese canal si el proveedor decide trasladarse al respectivo SCH junto con sus usuarios. Si el canal resultara mucho más congestionado que el propio canal, entonces no se realiza ningún cambio, en caso contrario se escoge el canal menos congestionado. Por otra parte el nodo proveedor haya una vez escogido el canal, envía un mensaje de control a toda la



red para que todos los nodos presentes actualicen los valores de sus matrices. Mientras que el nodo proveedor se mantenga activo en la red o continúe ofreciendo el servicio, el algoritmo se actualiza periódicamente para estar siempre atento a los cambios que se producen en la VANET.

El objetivo será utilizar los canales de servicio de una manera más eficiente por lo que se espera que el número de nodos en cada canal se encuentre equilibrado en toda la red de manera constante. No obstante las condiciones de cada canal no son equitativas, por lo que al encontrarse ubicados en diferentes frecuencias se espera que las atenuaciones y las pérdidas por propagación sean distintas en cada SCH. Es por eso que NASCA deberá ir acompañado con el PC, en este caso con el algoritmo MCA, para mitigar las diferencias que existen entre un canal u otro.

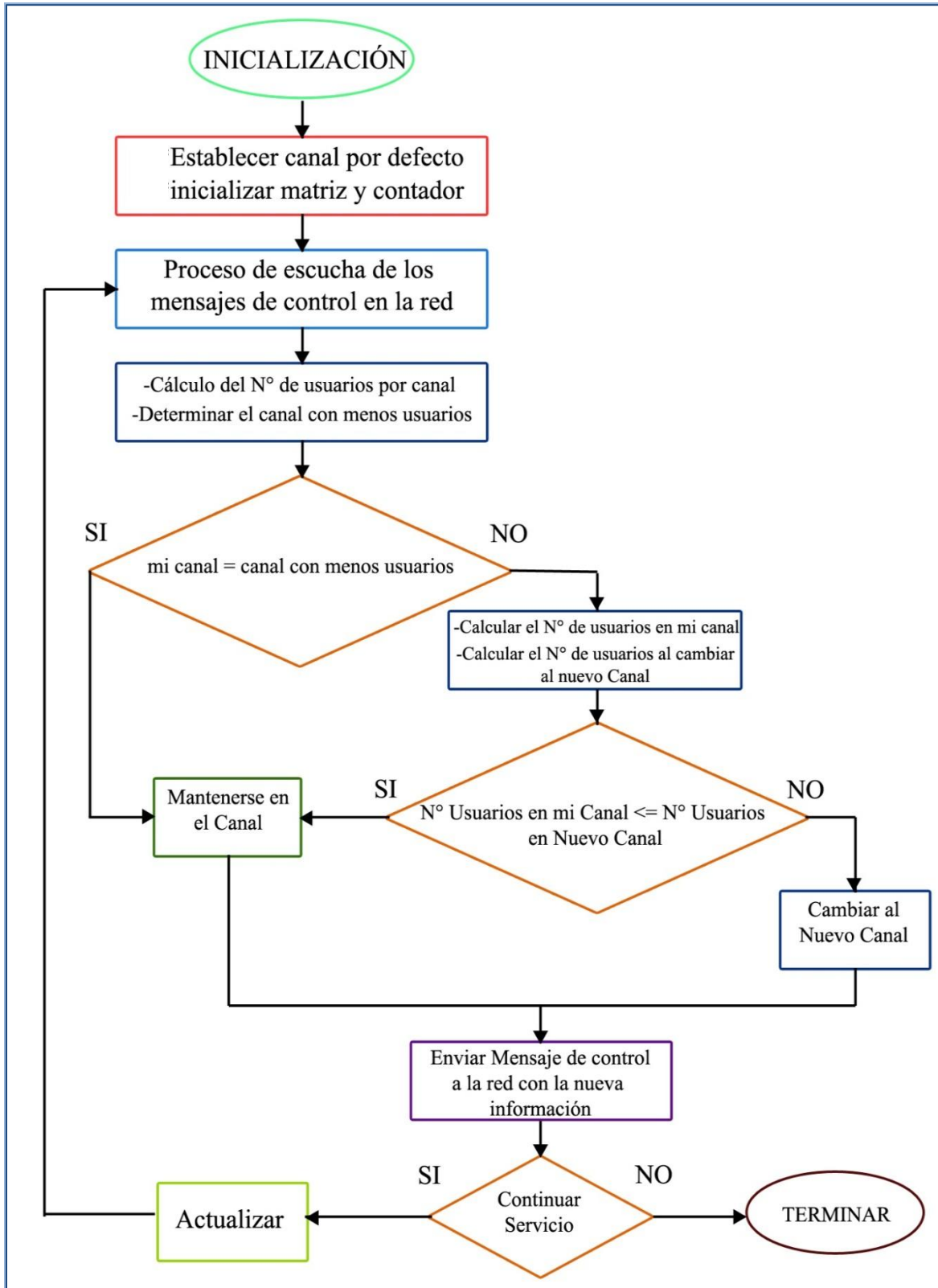


Figura 2.6 Diagrama de flujo de NACSA. Por los autores



2.5.3.3 Adaptación del NACSA en VANET

Para el modelo VANET SA/PC, el algoritmo NACSA va acompañado con el algoritmo MCA, por otra parte el funcionamiento estará regido por las siguientes especificaciones:

- 1 Cada nodo contiene una matriz llamada matriz usuarios donde almacena el canal de servicio usado por cada nodo. Los mensajes WSA son utilizados como información de control entre todos los proveedores y los usuarios.
- 2 El proveedor aplica procedimiento de SA cada vez que envía un mensaje WSA, el proveedor toma de la matriz usuarios la información necesaria para la ejecución del algoritmo.
- 3 Los mensajes WSA son enviados en *Broadcast*. Con cada mensaje WSA los usuarios y demás proveedores actualizan en la matriz usuarios el canal usado por cada proveedor.
- 4 Cuando un usuario decide suscribirse a un servicio lo hace mediante el mensaje JOIN y el canal de servicio al cual se acaba de suscribir.
- 5 El proveedor obtiene la posición del usuario¹⁰ suscrito que se encuentra dentro de la información del mensaje y procede a calcular la potencia mediante el algoritmo MCA para luego iniciar la transmisión. Los demás proveedores usan el mensaje JOIN para la actualización de la matriz de usuarios.
- 6 Con la llegada del primer mensaje WSM, el usuario obtiene la potencia de la cabecera del mismo y procede a hacer el intercambio de información.
- 7 Cuando finaliza el intercambio de paquetes, el usuario envía un mensaje de desconexión (DISJOIN) que permite a los demás nodos actualizar sus respectivas matrices de usuarios.

Por último NACSA y MCA funcionan o interactúan directamente con la capa de aplicación permitiendo a la capa MAC y la capa física trabajar transparentemente, únicamente incidiendo cuando se producen cambios en el número de SCH utilizado y deba ajustarse los niveles de potencia respectivamente.

2.5.4 Clases de Archivos

En VEINS se pueden distinguir los siguientes tipos de archivos:

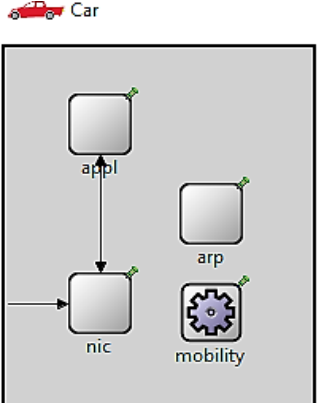



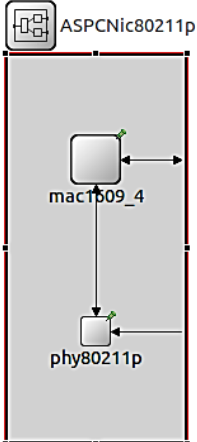
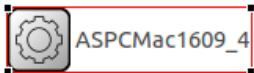
¹⁰ Las redes VANET como se menciona en el primer capítulo, cuentan con sensores GPS que le permiten determinar su ubicación dentro de un mapa ya preestablecido. En este trabajo de grado se consideran que los nodos conocen su ubicación por defecto.



- **Archivos .NED:** Los archivos escritos en lenguaje de descripción de red (NED, *Network Description*), estos describen la estructura modular de los componentes de simulación y las conexiones entre los mismos [37].
- **Archivos C++:** Los archivos C++ se encargan de la lógica de cada componente frente a los diferentes eventos en la red a lo largo de la simulación.
- **Archivos de SUMO:** Son archivos generados por el simulador de movilidad, sirven como interfaz de comunicación entre OMNET y sumo.
- **Mensajes:** Describen el formato de los diferentes mensajes que se transmiten en la red, o en las capas de red en el interior de cada nodo.
- **Archivos de configuración:** Son archivos que sirven para configurar los parámetros de la red y de cada nodo.

2.5.5 Topología y Componentes de la red

Los modelos VANET y VANET SA/PC comparten la misma topología y los mismos componentes, su diferencia radica en su funcionamiento. En la red se distinguen dos componentes principales, *Car* y *ASPCScenario*, el primero se encarga de abstraer la estructura de un nodo en la red, el segundo describe la estructura de los componentes encargados de las operaciones de gestión de la red, tales como comunicaciones entre los nodos, manejo de los canales, movilidad de los nodos entre otros; adicionalmente el módulo *CapacityMeter* se encarga de obtener las distintas gráficas y resultados necesarios para el análisis de la capacidad de la red. Los componentes de la red se pueden describir mediante los archivos .NED descritos en la Tabla 2.6, en esta se aprecian los módulos y submódulos de cada uno.

MODULO	DESCRIPCIÓN	DISEÑO
Car	Representa un nodo en una red VANET <i>Submódulos:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Appl • Arp • Nic • mobility 	
appl	Representa la AU del vehiulo.se encarga del despliegue de los servicios WAVE.	
mobility	Este módulo se encarga de la movilidad del vehículo, sirve como interfaz entre el vehículo y el simulador de movilidad.	
arp	Representa la implementación del protocolo de resolución de direcciones (ARP), tiene como responsable de encontrar una dirección MAC a partir de una psld	
Nic80211p	Representa la tarjeta de interfaz de red <i>Submódulos:</i> <ul style="list-style-type: none"> • ASPCMac 1609_4 • phyLayer80211p 	
ASPCMac1609_4	Hace la abstracción de la capa MAC, procesa los mensajes provenientes de la capa de aplicación y la capa física.	


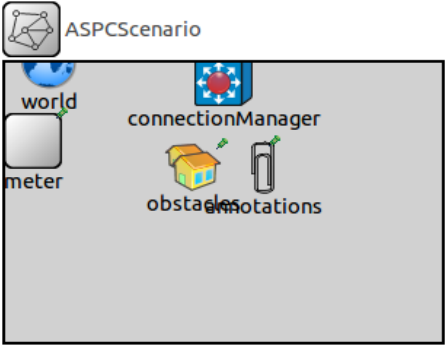



phyLayer80211p	Hace la abstracción de la capa física, comunica el modulo Car con el escenario	 PhyLayer80211p
ASPCScenario	Representa la red vehicular, maneja dinámicamente la circulación de los vehículos a través d la carretera. <i>Submodulos:</i> <ul style="list-style-type: none"> •ConecctionManager •BaseWorldUtility •ObstacleControl 	
ConnectionManager	Coordina las conexiones entre todos los módulos de forma dinámica.	 ConnectionManager
BaseWorldUtility	Provee información y métodos útiles para toda la red en conjunto.	 BaseWorldUtility
ObstacleControl	Modela los obstáculos de la transmisión vía radio.	 ObstacleControl

Tabla 2.6 Componentes del modelo de simulación. Por los autores

2.5.6 Archivos y Clases C++

Los archivos C++ se encargan de dar el funcionamiento lógico de cada componente de la red. En el Anexo B se muestra una breve descripción de los principales métodos de cada módulo usado para la creación de los modelos VANET y VANET SA/PC

2.5.7 Mensajes

Los mensajes permiten el intercambio de información de los nodos la red e internamente en cada nodo a través de cada capa. En el Anexo C se muestra una breve descripción de los mensajes usados en la implementación de los modelos VANET y VANET SA/PC

2.5.8 Configuración del Modelo

Los parámetros de configuración del modelo se configuran en el archivo ASPCvanet.ini los cuales por defecto se inicializan tal como lo indica la Tabla 2.7. El modelo de pérdidas descrito en 2.4.2 se configura en el archivo Config.xml, adicionalmente el exponente de pérdidas por distancia es tomado de [30].



PARAMETRO	VALOR
Tamaño máximo del Escenario la red	4000m ²
Número de usuarios	Variable
Número de proveedores	variable
Tiempo máximo de simulación	800s
Frecuencia portadora	5.89e9 Hz
Protocolo de transporte	WSMP
Periodo de envío mensajes WSA	0.1s
Potencia máxima de transmisión	63.095mW
Sensibilidad de las tarjetas de red	-89dBm
Umbral de ruido térmico	-110dBm
Exponente de pérdidas por distancia alpha	2.4

Tabla 2.7 Parámetros de simulación

2.6 FASE 5: CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En esta fase se aborda la programación de los archivos de simulación y la validación del modelo. Este último se tratará en el tercer capítulo, el cual contara con una fase de pruebas para comprobar el buen funcionamiento de los modelos.

2.7 FASE 6: EXPERIMENTACIÓN CON EL MODELO

Esta fase será se llevaran a cabo las simulaciones donde se harán los ajustes respectivos a los modelos y se tomarán los resultados de la simulación mediante tablas y gráficas. Este apartado se tratará con más detalle en el tercer capítulo del trabajo de grado.

2.8 FASE 7: DOCUMENTACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En esta última fase, que será tratada con mayor detalle en el tercer y cuarto capítulo del trabajo de grado, se realizara la respectiva documentación de los análisis de resultados y las conclusiones.





CAPITULO 3

EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se abordan las fases de experimentación, documentación y presentación de resultados tal como se definió en el apartado 2.1. Para la fase de experimentación se definieron dos escenarios de simulación, en cada escenario se implementa una aplicación diferente. En la Tabla 4.1 se describe las características de funcionamiento y de QoS de cada aplicación basadas en los trabajos de [38], [39] y [40]. Las aplicaciones consignadas en la Tabla 3.1 son las más representativas dentro de las VANET debido a sus parámetros de funcionamiento y de QoS establecidos.

Escenario	Aplicación	Clase de prioridad del mensaje	[AC]	Máxima Latencia Permitida	Tipo comunicación	Rango del mensaje	Canales para el envío de Datos
1	<i>SAFETY WARNING APPLICATION</i>	CLASE 2	2	100ms	V2V	50-300m	178, 174, 176, 180, y 182
2	<i>GROUP COMMUNICATIONS</i>	CLASE 4	0	500ms	V2V	300m	174, 176, 180, y 182

Tabla 4.1 Aplicaciones VANET con requerimientos de QoS. Tomada de [38]

En ambos escenarios los vehículos circulan en un ambiente de grilla urbano ubicado en la ciudad de Popayán como se muestra en la Figura 4.1, donde el movimiento de los vehículos está delimitado entre la calle 13 a la calle 6, y desde la carrera 2 hasta la carrera 9. Para cada caso se varió de forma iterativa el número de vehículos presentes en la red de la siguiente forma: 30, 50, 100,150 ,200. Con el fin de analizar el comportamiento de la red frente a la variación del número de nodos y de esta forma determinar de forma cualitativa la capacidad¹¹.

Para la verificación del correcto funcionamiento de los modelos VANET y VANET SA/PC, se realizaron pruebas preliminares con las cuales se comprobó que los modelos cumplen con las especificaciones descritas en el capítulo anterior referente a la implementación del

¹¹ La Capacidad de una red debe entenderse de aquí en adelante, como la máxima cantidad de nodos o usuarios que pueden ser atendidos por la red, con una distribución equitativa de los RR, sin deteriorar la QoS para cada uno de ellos.

modelo de simulación. Para la validación del modelo se optó por incluir un modelo basado en VANET sin la implementación de procedimientos de SA y PC, que sirvió como punto de comparación con el modelo VANET SA/PC. Se tomó como 3 el número de simulaciones por cada caso estudio esto debido a los altos tiempos de simulación que dependiendo de las capacidades de procesamiento de los equipos, podrían superar las 24 horas por simulación.

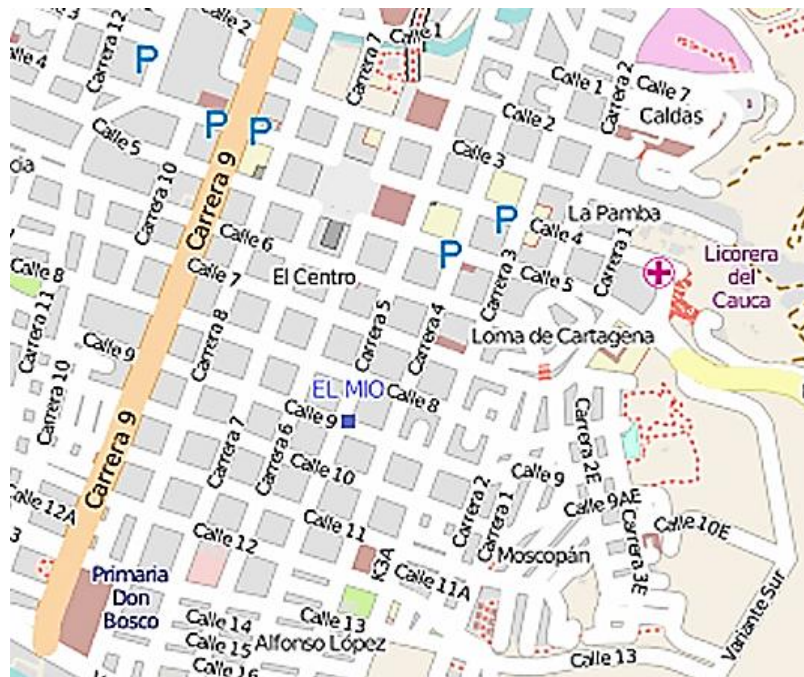


Figura 4.1 Sector centro urbano de Popayán. Tomada de Open Street Map

4.1 PRUEBAS PRELIMINARES DE FUNCIONAMIENTO

4.1.1 Establecimiento de la comunicación entre dos nodos

Esta prueba tuvo como objetivo la verificación del establecimiento de la comunicación entre un proveedor y un usuario. La Tabla 4.2 muestra los parámetros de configuración de esta prueba.

Numero de nodos	de	Número de proveedores	de	Tiempo de simulación
2		1		24s

Tabla 4.2 Configuración de los nodos y tiempos de simulación

En la Figura 4.2 se pueden apreciar los tipos de mensajes que intervienen en la comunicación, en resumen el proveedor envía un mensaje WSA cada 100 ms, el usuario se suscribe al servicio a través de un mensaje JOIN; una vez establecida la comunicación se realiza el intercambio de datos.

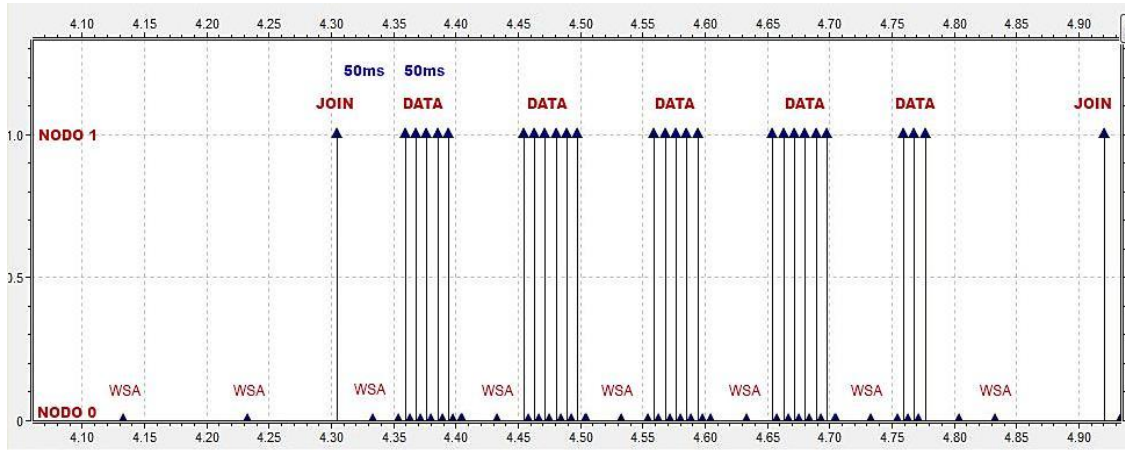


Figura 4.2 Interpretación grafica transmisiones en el tiempo

4.1.2 Variación de la potencia de transmisión

Esta prueba tiene como objetivo la verificación de la aplicación del algoritmo MCA en el modelo VANET SA/PC. La Tabla 4.3 muestra los respectivos parámetros de configuración.

Numero de nodos	de	Número de proveedores	de	Tiempo de simulación
30		15		550s

Tabla 4.3 Configuración de los nodos y tiempos de simulación

En esta prueba se eligió el Nodo 4 el cual tiene el rol de proveedor, en la Figura 4.3 se puede apreciar la variación de la potencia de transmisión a través del tiempo, los mensajes de control se envían con una potencia máxima de 18 dBm, la potencia con que se envía los mensajes correspondientes a los datos varía dependiendo de la distancia entre el Nodo 4 y sus usuarios. La Figura 4.4 es la potencia de transmisión en el nodo 4 sin la aplicación de MCA, en esta se aprecia que la potencia se mantiene fija en 18 dBm durante toda la simulación. Tanto en el modelo VANET SA/PC como en el modelo VANET se define 18 dBm como la potencia máxima de acuerdo al trabajo realizado en [30].

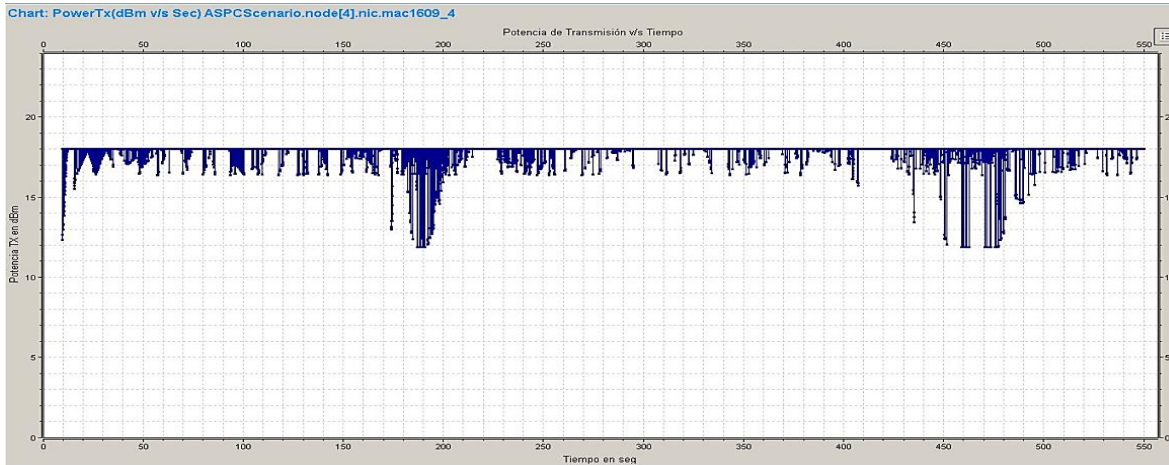


Figura 4.3 Potencia de transmisión nodo 4 con MCA

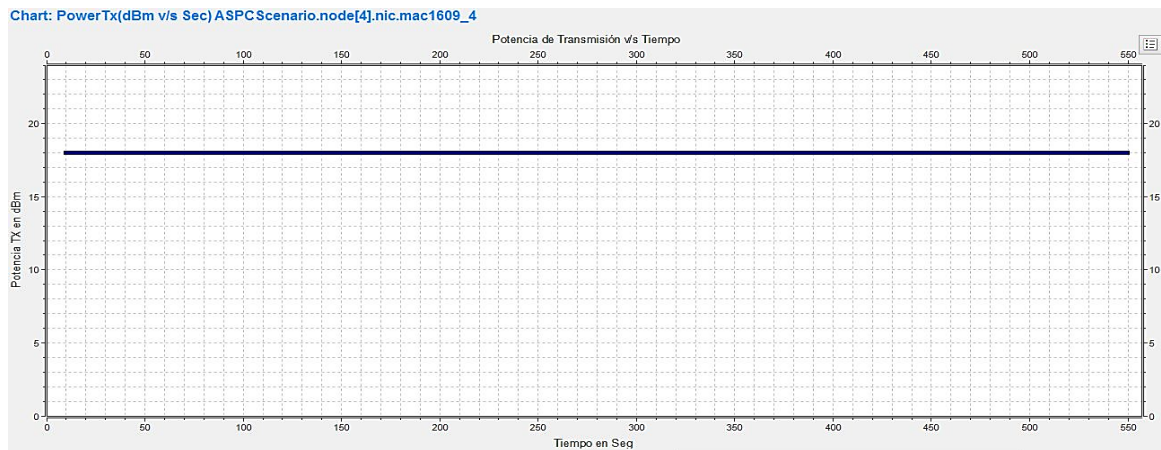


Figura 4.4 Potencia de transmisión nodo 4 sin MCA

4.1.3 Asignación del canal de radio

Esta prueba tiene como objetivo la verificación de la implementación del algoritmo NACSA en el modelo VANET SA/PC. La Tabla 4.4 muestra los parámetros de configuración. Para el análisis se escogió el nodo 16.

Numero de nodos	de	Número de proveedores	de	Tiempo de simulación
30		15		200s

Tabla 4.4 Configuración de los nodos y tiempos de simulación

La Figura 4.5 muestra como el modelo VANET implementa la conmutación de canal en un nodo de la cual se habló en 1.4.2. La Figura 4.6 muestra la combinación de dos procesos, por un lado la conmutación de canal definida en el estándar WAVE, por otro el cambio de canal producto de la implementación del algoritmo NACSA en el modelo VANET SA/PC. En la Figura 4.7 se puede apreciar detalladamente el proceso de cambio de canal.



Inicialmente el nodo 16 se mantiene conmutando periódicamente entre el canal 178 y 180 correspondientes a CCH y a un SCH configurado por defecto, cuando el algoritmo considera pertinente el cambio de canal, el nodo continuo la conmutación entre 178 y el canal elegido.

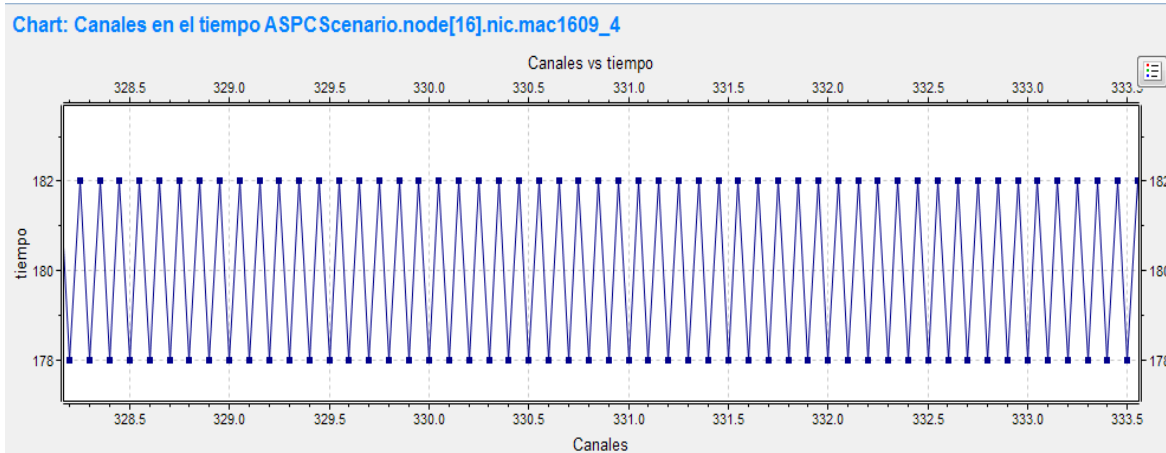


Figura 4.5 Canales en el tiempo nodo 16

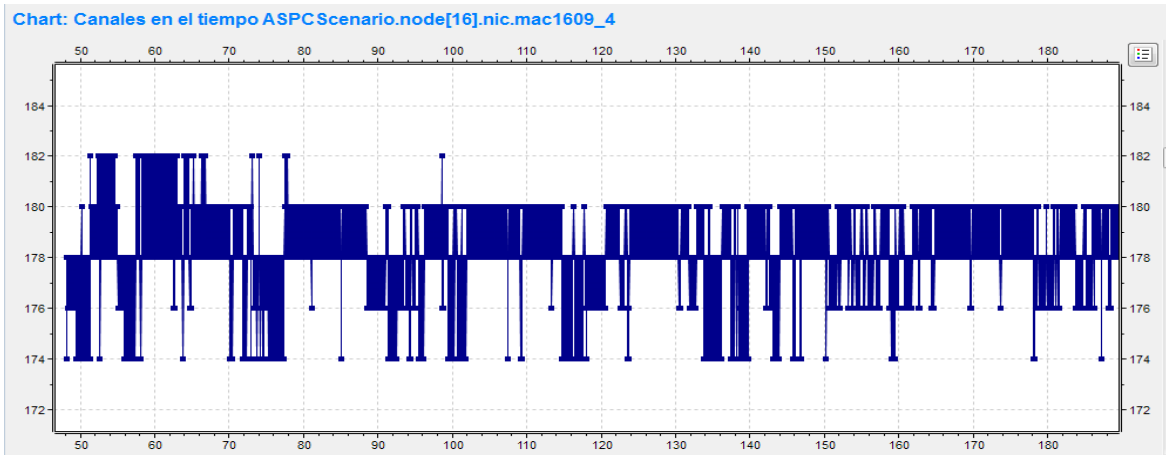


Figura 4.6 Canales en el tiempo nodo 16 con NACSA

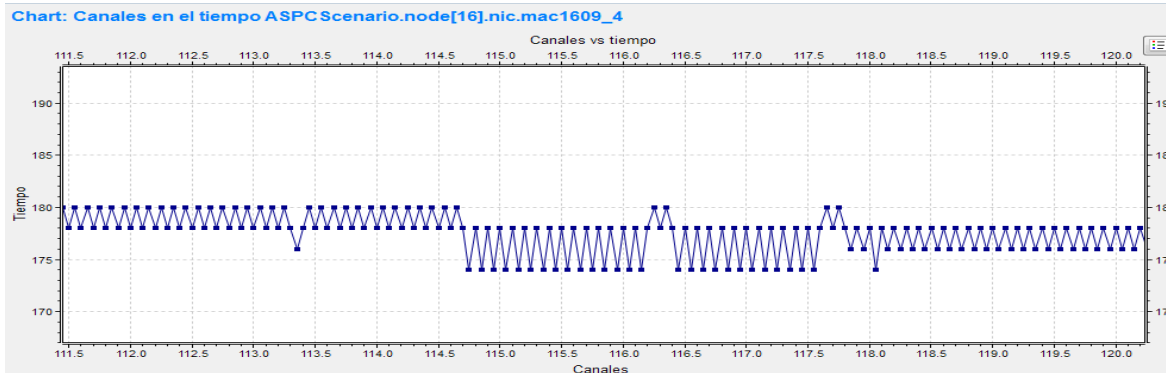


Figura 4.7 Canales en el tiempo nodo 16 zoom con NACSA

4.2 EXPERIMENTACIÓN ESCENARIO 1

Para este escenario, se implementó la Aplicación de Advertencias de Seguridad (SWA, *Safety Warning Application*) descrita en la Tabla 4.1. La distribución de proveedores es 1 a 2, es decir existe un proveedor por cada dos vehículos en la red, además se contrastan los modelos VANET y el modelo VANET SA/PC. La Tabla 4.5 muestra el número de nodos de cada simulación, el número de proveedores respectivamente y el tiempo de simulación. Se consideraron diferentes tiempos de simulación para cada caso debido al tiempo de establecimiento de los nodos en la red. La relación entre usuarios y proveedores se mantiene para poder emular las comunicaciones punto a punto entre los vehículos.

	Numero de nodos	Número de proveedores	Tiempo de Simulación [segundos]
Caso 1	30	15	270
Caso 2	50	25	315
Caso 3	100	50	430
Caso 4	150	75	550
Caso 5	200	100	740

Tabla 4.5 Configuración Escenario 1

4.2.1 Presentación y Análisis de resultados

La capacidad de una red VANET puede estimarse en función de las transmisiones simultáneas [28], ya que cuanto mayor es el número de transmisiones simultáneas es mayor el número de nodos que la red puede soportar. En este trabajo se considera además de transmisiones simultáneas, el parámetro de latencia para la QoS y los parámetros de desempeño de la red como *throughput* y pérdida de paquetes, con el fin de estudiar el impacto que produce el incremento de vehículos en el despliegue de los servicios de una red VANET, así mismo se analiza como el uso de procedimientos de SA y PC ayudan a mitigar la degradación de estos parámetros.

4.2.1.1 Transmisiones simultáneas

Las redes VANET implementan CSMA/CA como método de acceso al medio, en el cual un nodo escucha si el canal está libre durante un Espacio Arbitrario de Inter trama (AIFS, *Arbitration Interframe Space*) antes de transmitir, si el canal está ocupado el nodo entra en *backoff*¹². Dos o más nodos pueden transmitir simultáneamente si transmiten a una frecuencia o si la distancia entre ellos es suficiente para que la interferencia sea considerada despreciable.

En este trabajo se consideran transmisiones simultáneas como el número de nodos que transmiten durante un intervalo con duración de tiempo igual al AIFS. La duración de AIFS depende de la categoría de acceso del servicio tal como se especifica en [9], que para este caso es de 72 us.

a) Modelo VANET SA/PC

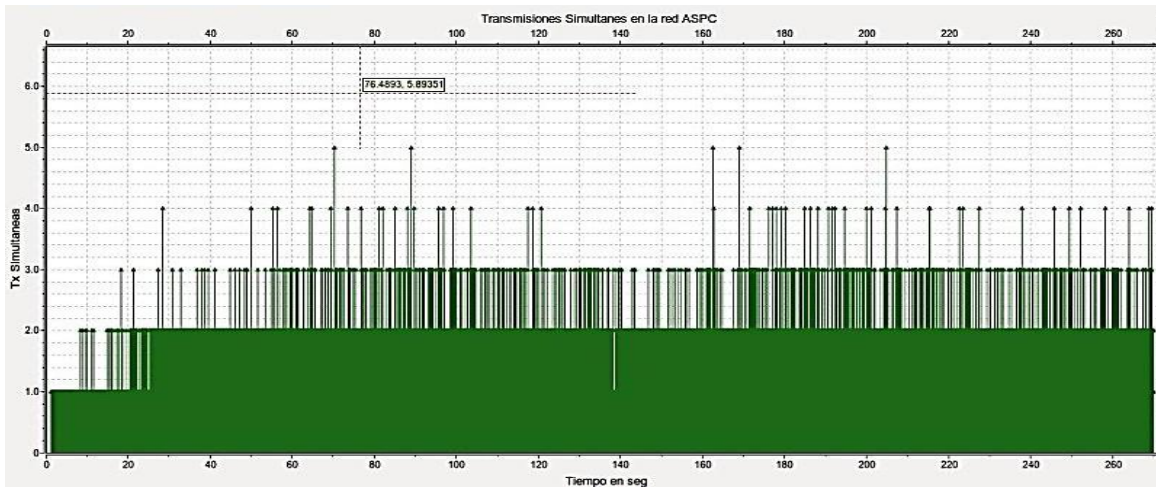


Figura 4.8 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 30 nodos

¹² Tiempo en el que un nodo espera para poder transmitir, cuando encuentra que el medio de transmisión se encuentra ocupado.

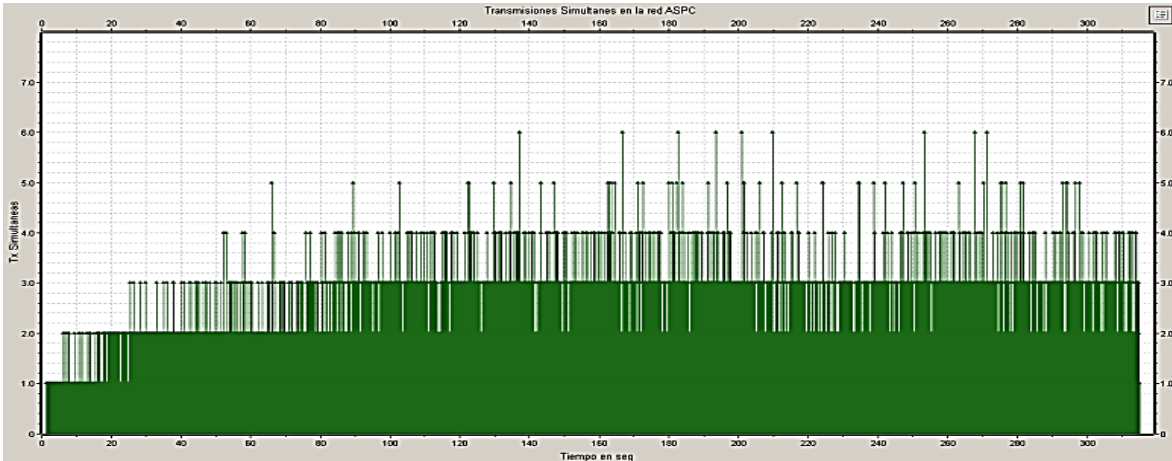


Figura 4.9 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 50 nodos

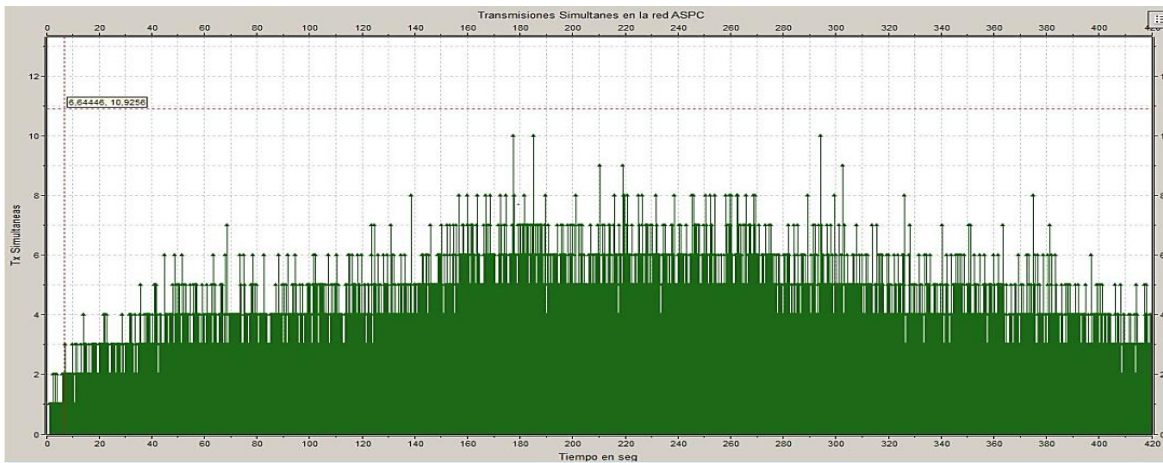


Figura 4.10 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 100 nodos

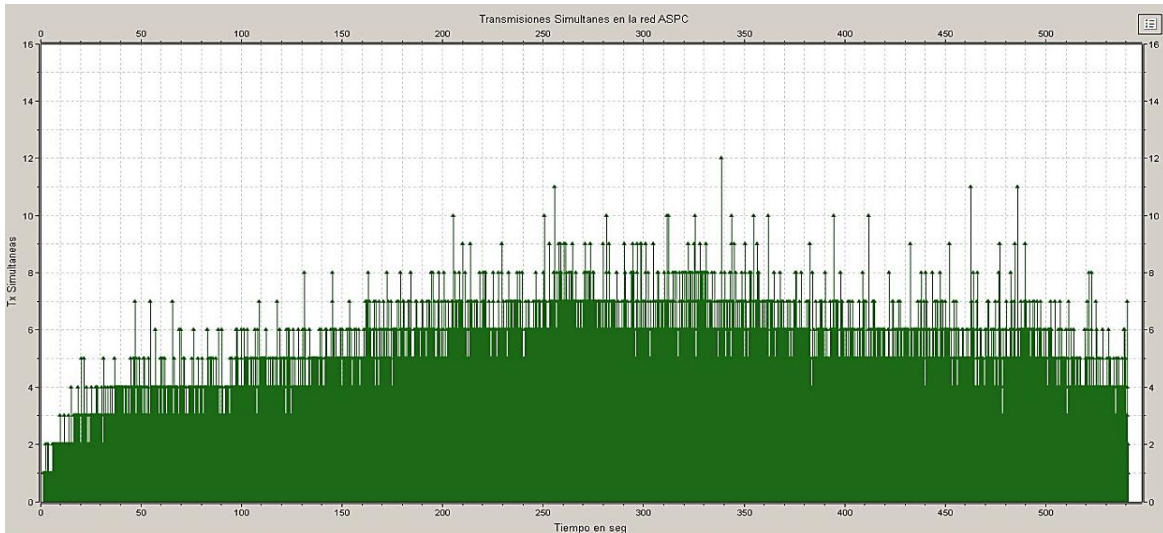


Figura 4.11 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 150 nodos

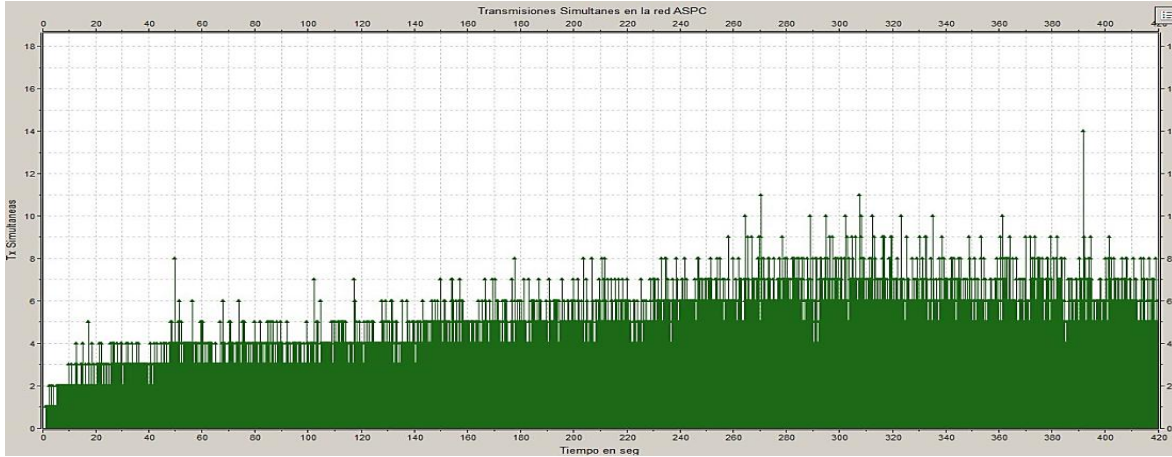


Figura 4.12 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 200 nodos

b) Modelo VANET

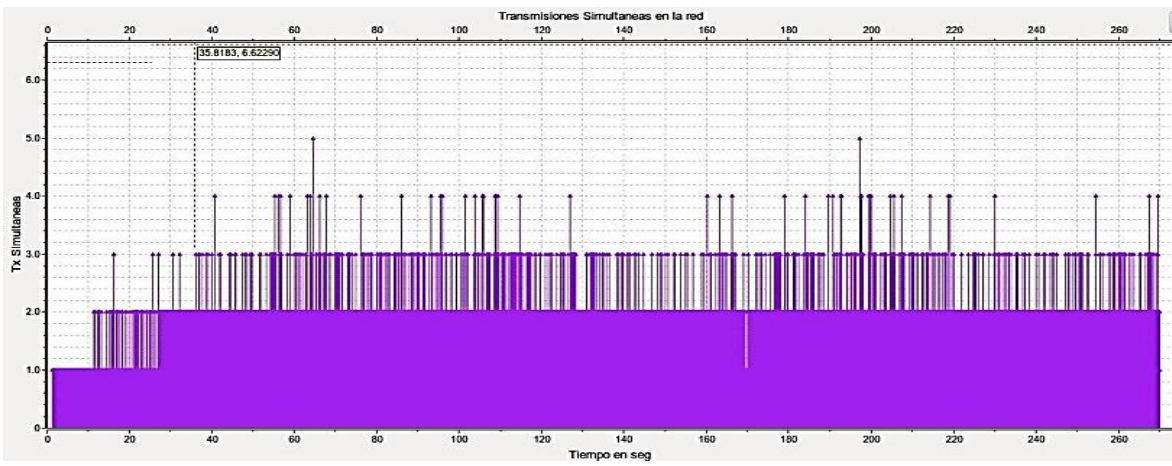


Figura 4.13 Transmisiones simultáneas modelo VANET 30 nodos

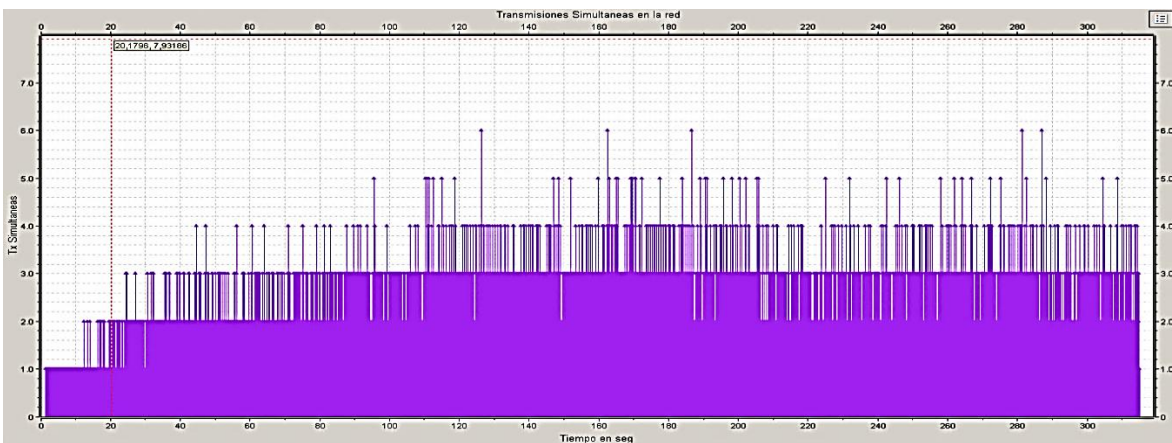


Figura 4.14 Transmisiones simultáneas modelo VANET 50 nodos

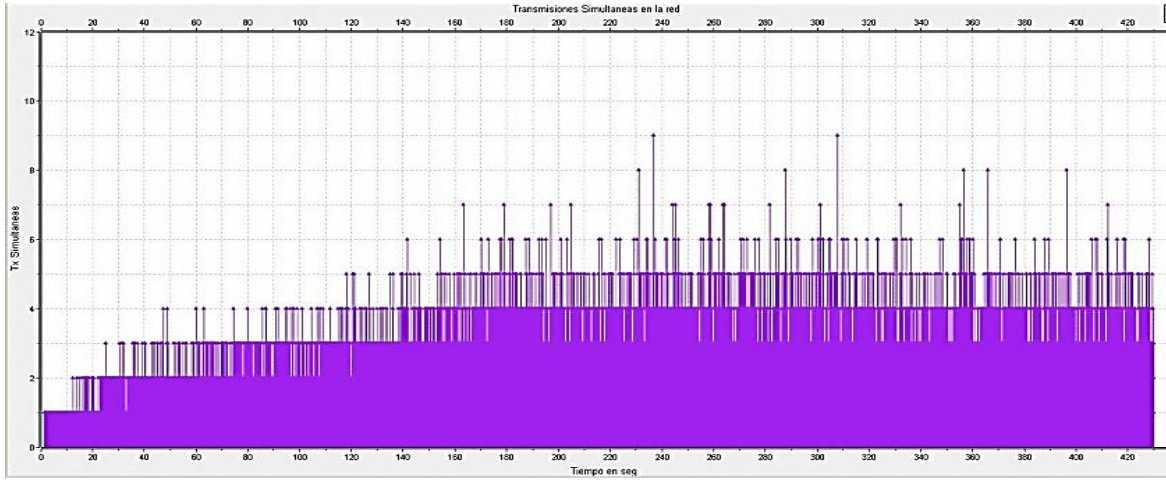


Figura 4.15 Transmisiones simultáneas modelo VANET 100 nodos

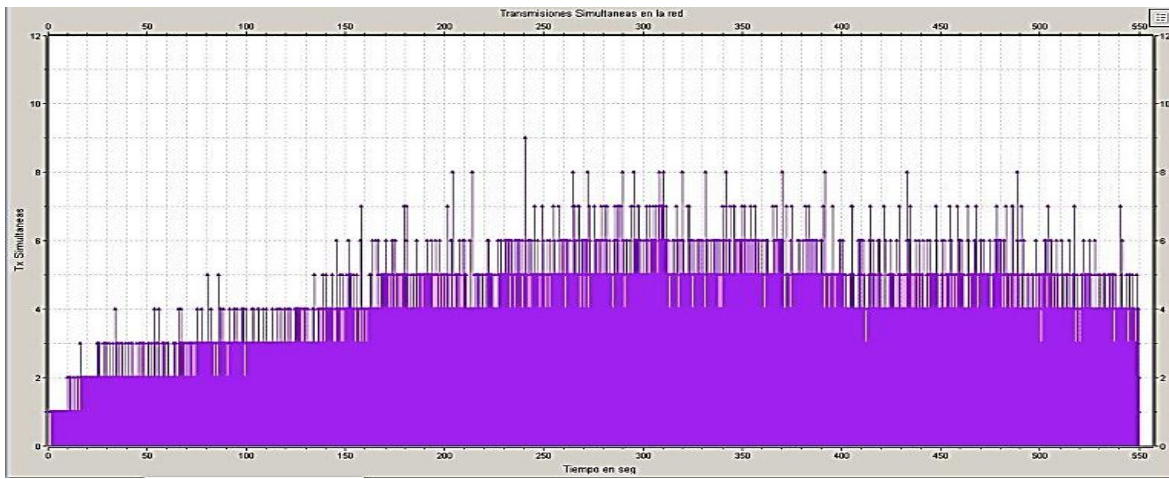


Figura 4.16 Transmisiones simultáneas modelo VANET 150 nodos

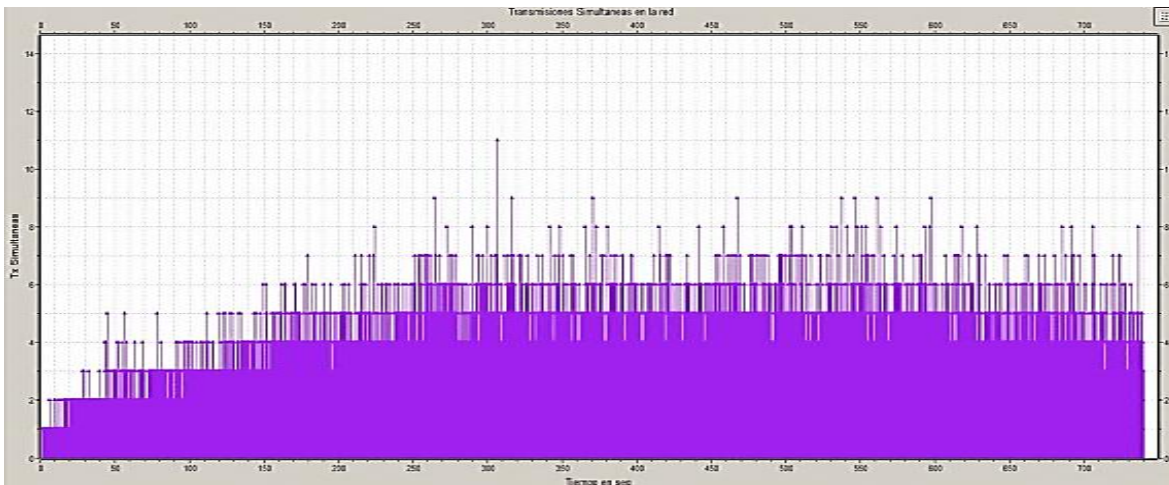


Figura 4.17 Transmisiones simultáneas modelo VANET 200 nodos



Las Figura 4.8, 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 muestran las transmisiones simultáneas obtenidas en el modelo VANET SA/PC, estas se comparan con las transmisiones simultáneas obtenidas en el modelo VANET las cuales se exponen en las Figura 4.13, 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17. En estas figuras se puede observar que el número de transmisiones simultáneas se incrementa escalonadamente hasta llegar a establecerse en el valor alto más concurrido¹³; esto se debe a que las transmisiones se ven afectadas por los tiempos en que los nodos aparecen progresivamente en la red. En condiciones de congestión este valor decae, así mismo en condiciones de mínima congestión se puede observar que la red alcanza el valor máximo de transmisiones simultáneas.

El uso del algoritmo MCA ayuda a reducir la interferencia en una red con alta densidad de nodos al controlar los niveles de potencia de cada mensaje que envían los nodos a la red. MCA al hacer reuso espacial, limita el área de servicio de los nodos lo que conduce a la reducción de la interferencia cocanal entre nodos vecinos. Esto permite que los nodos tengan una mayor probabilidad de encontrar el medio de transmisión libre y de esta forma puedan transmitir simultáneamente.

El uso del algoritmo NACSA permite utilizar los canales que estén siendo menos utilizados, por lo que se reduce la congestión en un canal específico. Al haber una menor congestión en los canales, se reduce la espera de los nodos para encontrar el medio de transmisión libre, lo que aumenta directamente el número de transmisiones simultáneas en la red.

El reuso de frecuencia y el reuso espacial que se hace mediante la implementación de NACSA y MCA, se refleja en el aumento de transmisiones simultáneas en el modelo VANET SA/PC con respecto al modelo VANET, en simulaciones con igual número de nodos. Del anterior resultado se deduce que el modelo VANET SA/PC posee una mayor capacidad, al atender una mayor cantidad de usuarios simultáneamente.

¹³ El máximo de transmisiones simultáneas concurridas se refiere al valor más alto pero con mayor número de incidencias.

4.2.1.2 Throughput

El *throughput* es un parámetro de QoS, este mide la cantidad de información que llega exitosamente a cada nodo, está directamente relacionado con la capacidad de la red. En VANET no existe una especificación del *throughput* mínimo requerido para el despliegue de SWA o de cualquier otro servicio, por lo que este parámetro se utilizó como medida para evaluar el desempeño de la red en ambos modelos. Este trabajo tomó el modelo VANET como punto de referencia y se comparó con el modelo VANET SA/PC con el fin de analizar en cada modelo como se ve afectado el *throughput* cuando el número de nodos se incrementa.

a) Modelo VANET SA/PC

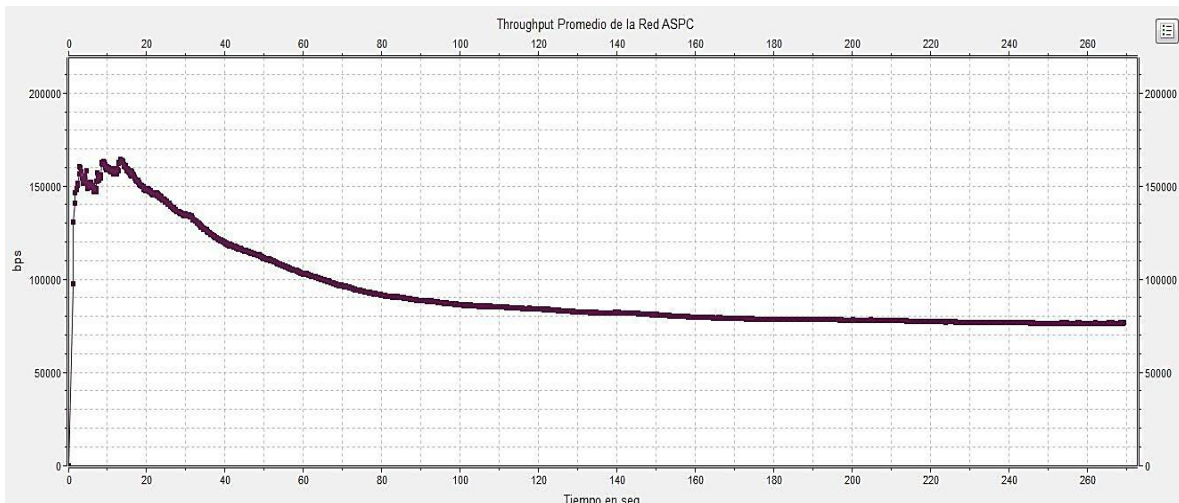


Figura 4.18 Throughput modelo VANET SA/PC 30 nodos

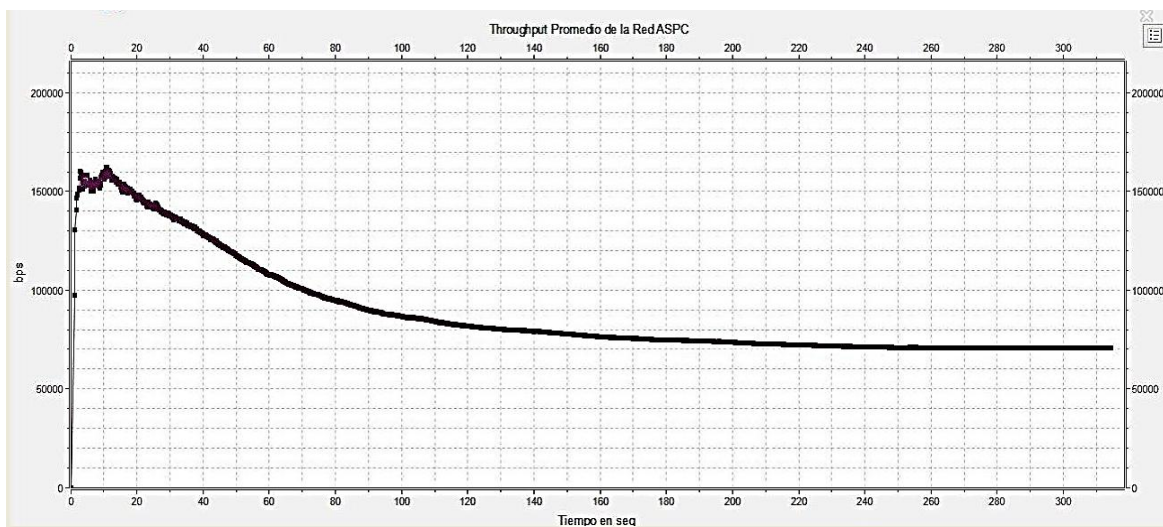


Figura 4.19 Throughput modelo VANET SA/PC 50 nodos

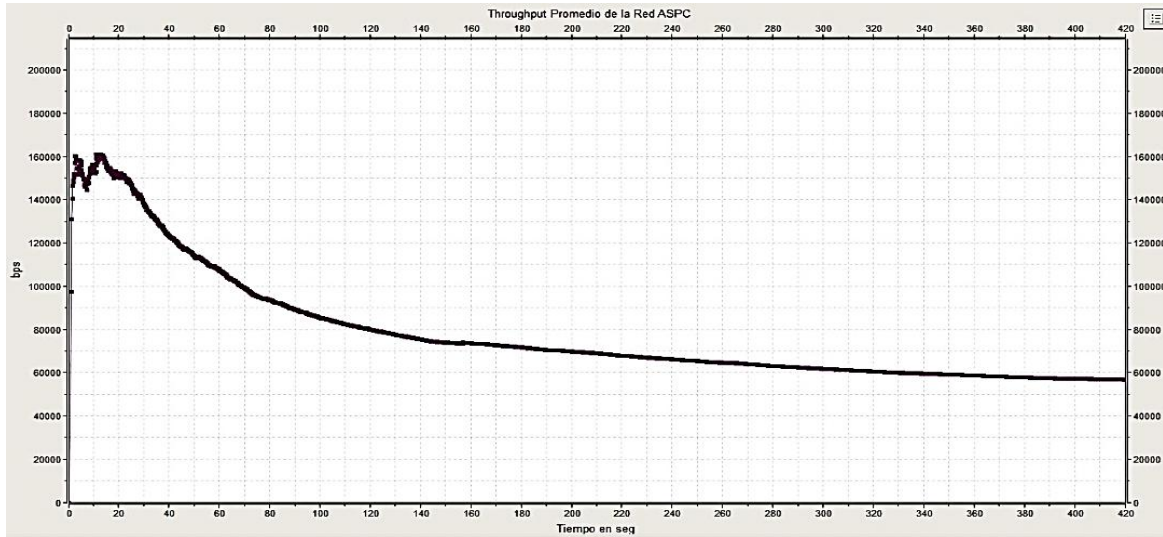


Figura 4.20 Throughput modelo VANET SA/PC 100 nodos

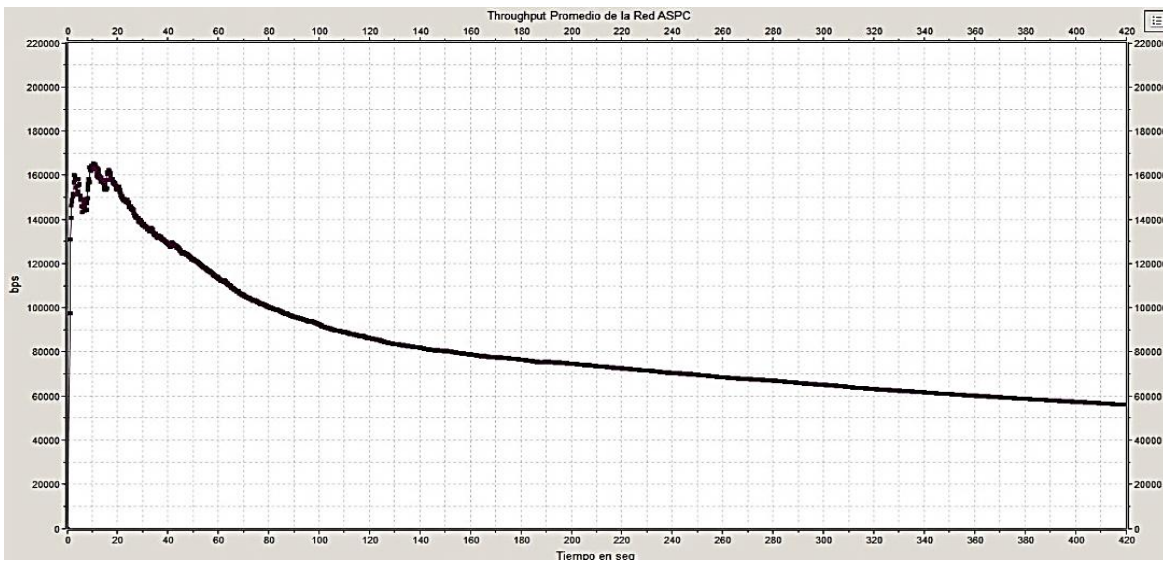


Figura 4.21 Throughput modelo VANET SA/PC 150 nodos

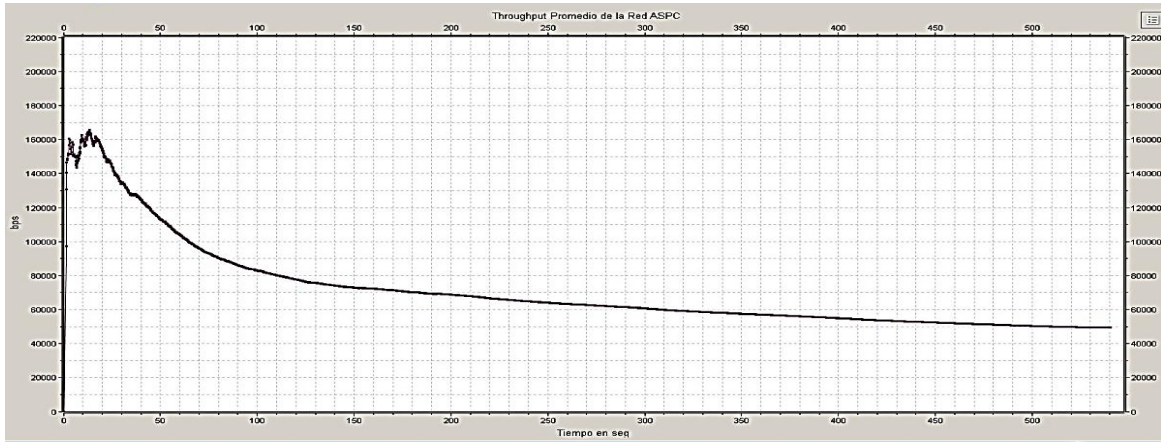


Figura 4.22 Throughput modelo VANET SA/PC 200 nodos

b) Modelo VANET

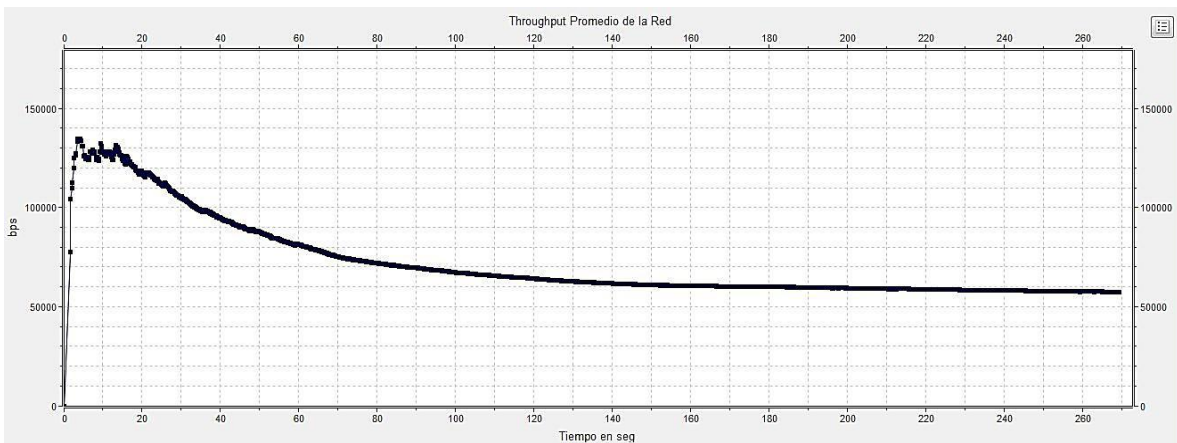


Figura 4.23 Throughput modelo VANET 30 nodos

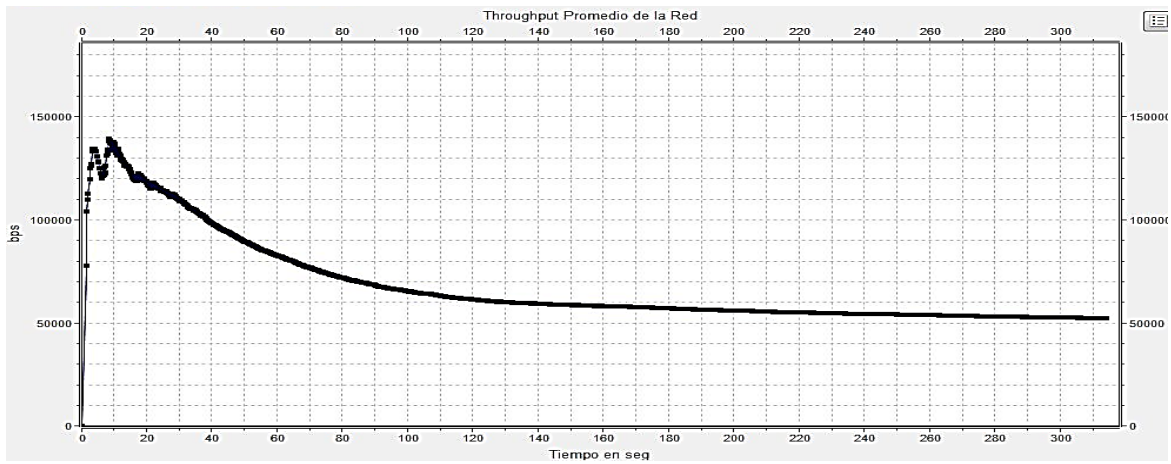


Figura 4.24 Throughput modelo VANET 50 nodos

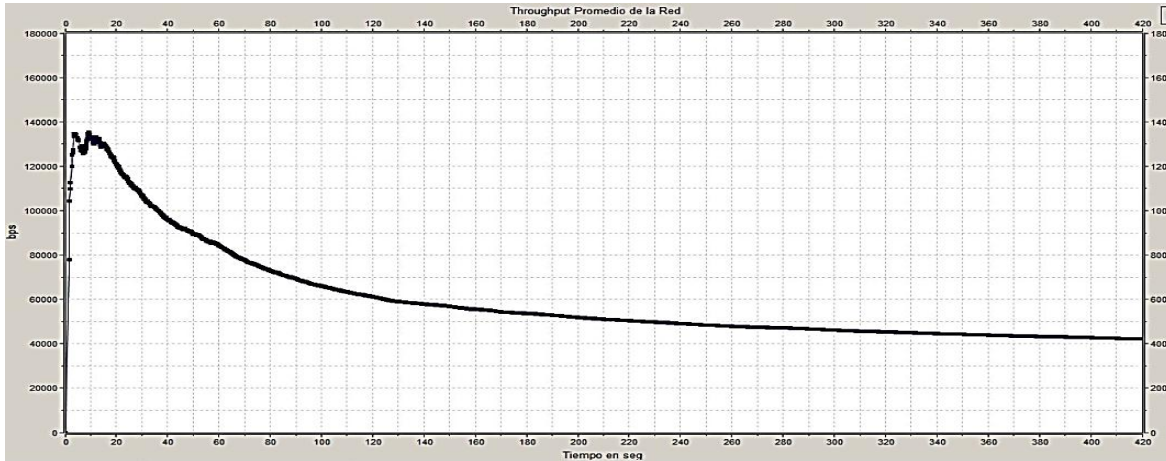


Figura 4.25 Throughput modelo VANET 100 nodos

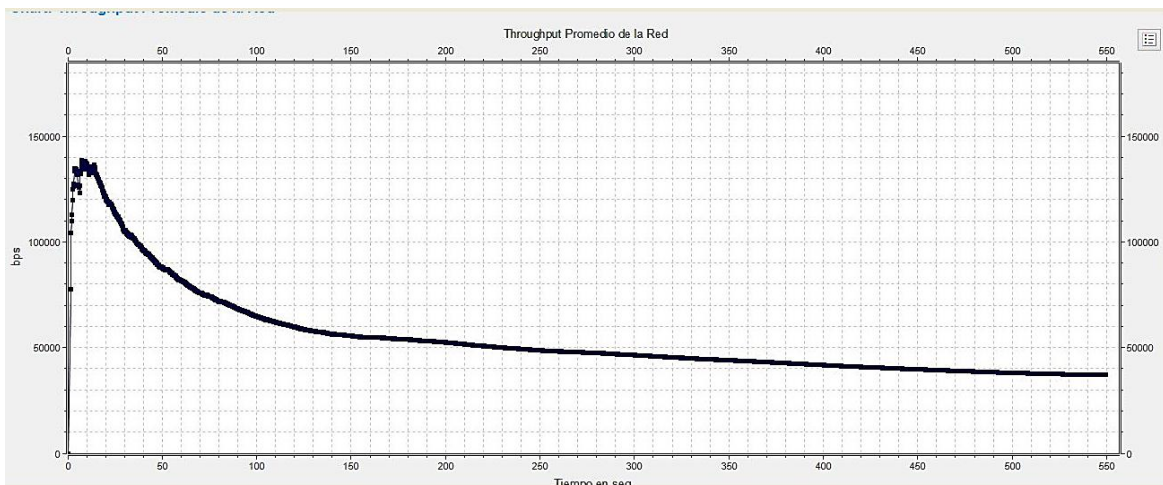


Figura 4.26 Throughput modelo VANET 150 nodos

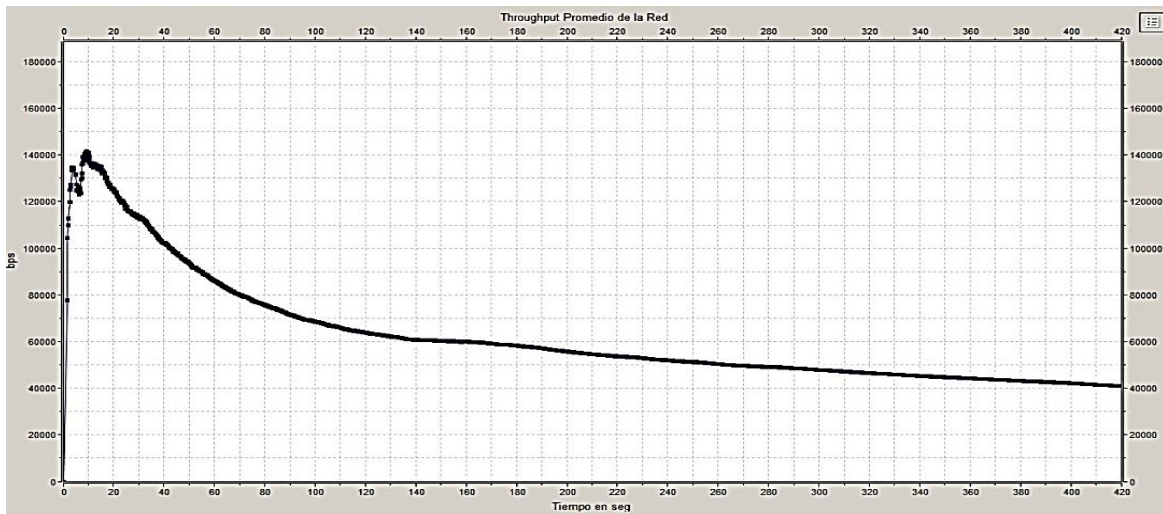


Figura 4.27 Throughput modelo VANET 200 nodos



Las Figura 4.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 muestran el *throughput* obtenido en el modelo VANET SA/PC para cada número de nodos, en estas se puede observar que el *throughput* tiene una leve degradación a medida que el número de nodos aumenta

En el *throughput* obtenido en el modelo VANET presentado en las Figura 4.23, 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27, se puede observar que al igual que el modelo VANET SA/PC el *throughput* se degrada con el incremento de nodos pasando de 60 kbps con 30 nodos a menos de 40 kbps con 200 nodos. Adicionalmente se puede observar que el *throughput* en el modelo VANET SA/PC es mayor en cada caso que el modelo VANET.

En todos los casos de simulación, existe un pico máximo de *throughput* en los primeros quince segundos de simulación, lo que corresponde a la aparición de 8 nodos en la red. Se puede decir entonces que la red alcanza su máximo desempeño en lo que se refiere al *throughput* hasta los 8 primeros nodos, a partir de este valor de tiempo el *throughput* promedio empieza a decaer de manera exponencial a medida que aparecen más y más nodos en la red. A pesar de este comportamiento, el modelo VANET SA/PC transmite un mayor volumen de información (con un pico inicial de 160 Kbps) con respecto al modelo VANET (con un pico inicial de 140Kbps). El hecho de que el número de transmisiones simultáneas sea más alto en un modelo que en otro, incide directamente en el flujo de información que reciben los nodos.

Por otra parte el algoritmo MCA evita a los nodos transmitir potencia adicional innecesaria que pueda interrumpir en las comunicaciones de otros nodos, lo que reduce la interferencia y disminuye la pérdida de paquetes en la recepción. Al haber un menor porcentaje de paquetes con errores, se incrementa el *throughput* de la red; mientras que un esquema sin PC tendrá un porcentaje mayor de pérdida de paquetes y por tanto obtendrá menores valores de *throughput* en la red. Cabe decir que el algoritmo NACSA contribuye a este efecto al reducir la congestión de los canales, por lo que vale decir que los procedimientos de PC y SA permiten tener un mayor número de nodos en la red, con una menor degradación en el *throughput*.

4.2.1.3 Latencia

Las aplicaciones SWA establecen 100 ms como la latencia máxima permitida, en este trabajo se analizó el impacto que tiene la implementación de MCA y NACSA sobre la latencia, a la vez que se evaluaron los cambios que se produjeron al incrementar el número de nodos en la red.



a) Modelo VANET SA/PC

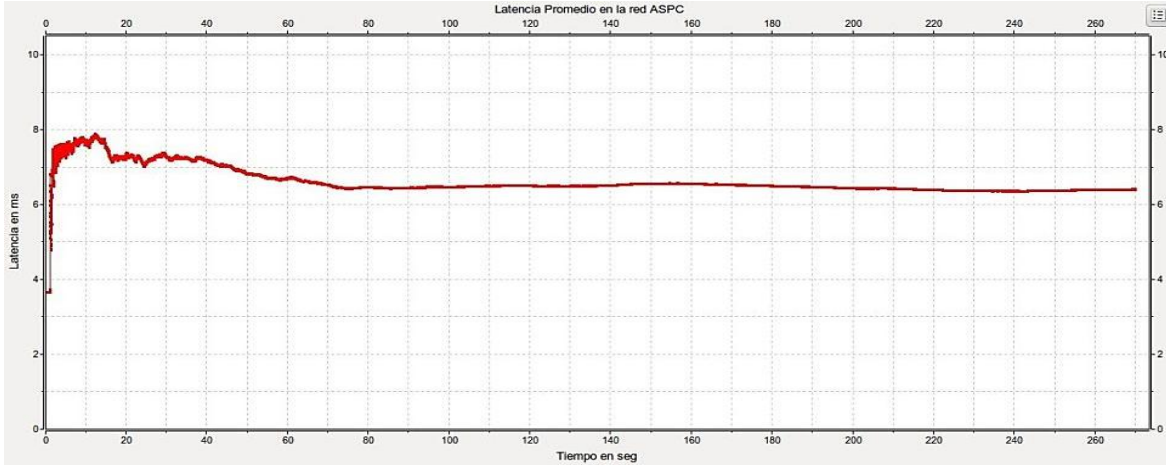


Figura 4.28 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 30 nodos

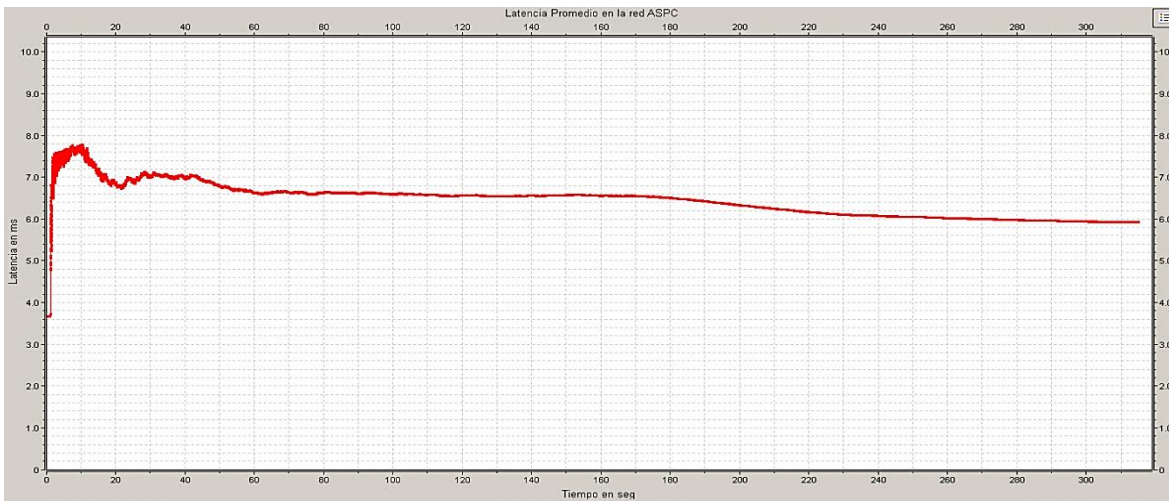


Figura 4.29 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 50 nodos

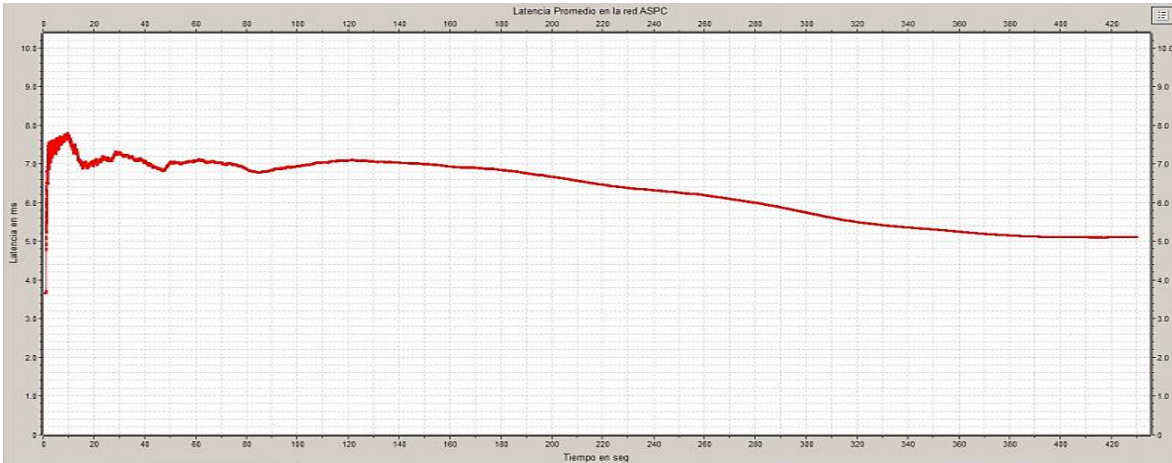


Figura 4.30 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 100 nodos

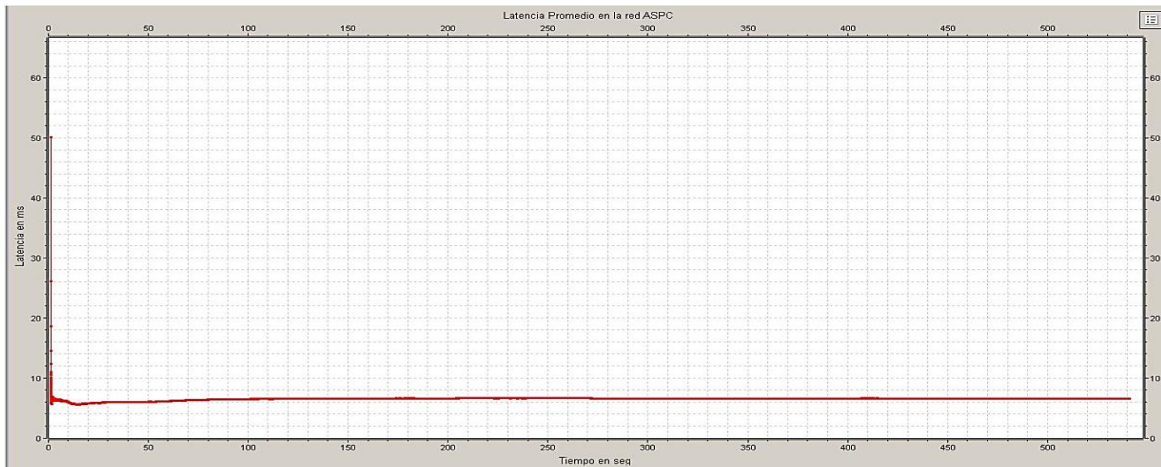


Figura 4.31 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 150 nodos

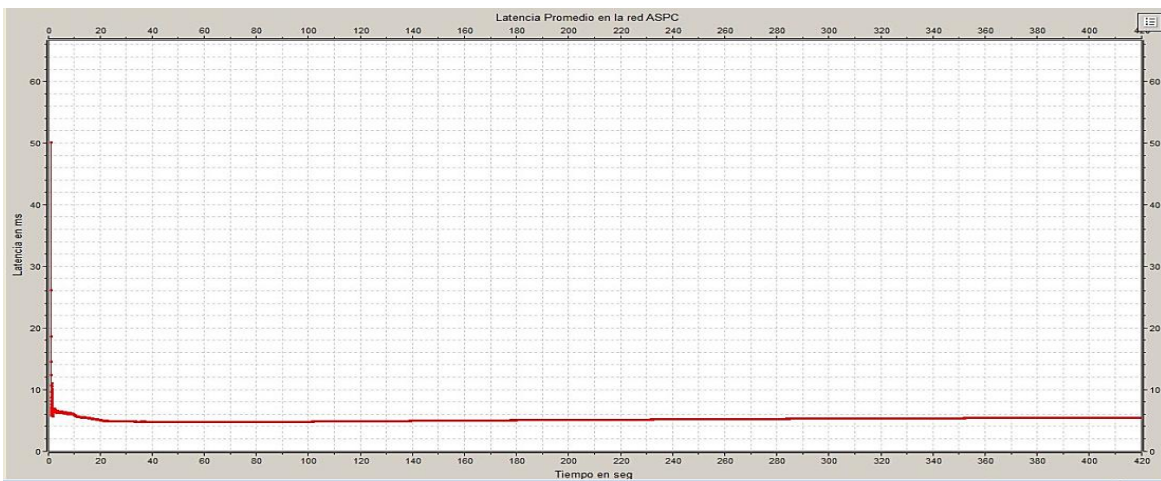


Figura 4.32 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 200 nodos



b) Modelo VANET

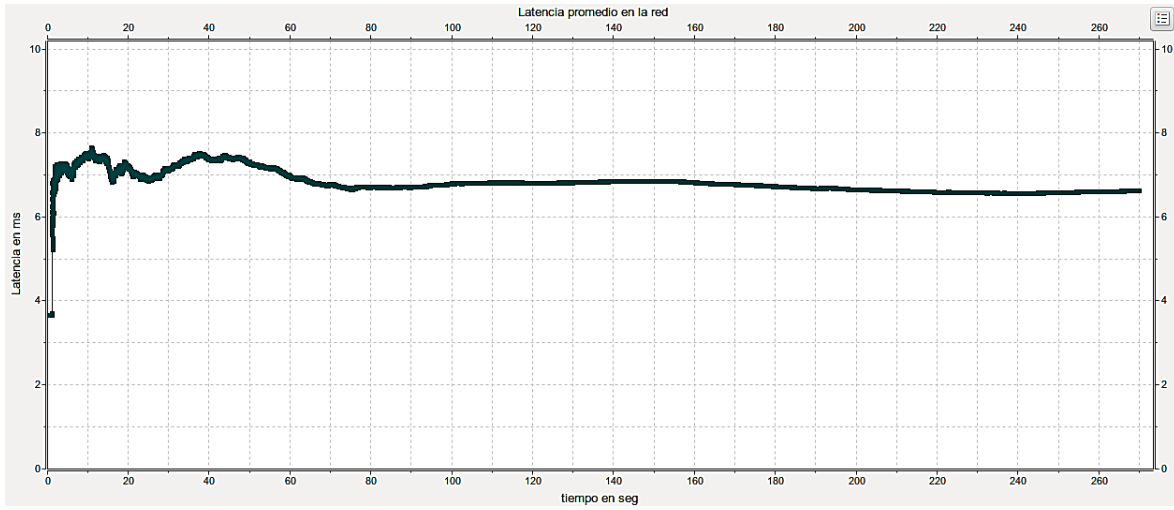


Figura 4.33 Latencia promedio modelo VANET 30 nodos

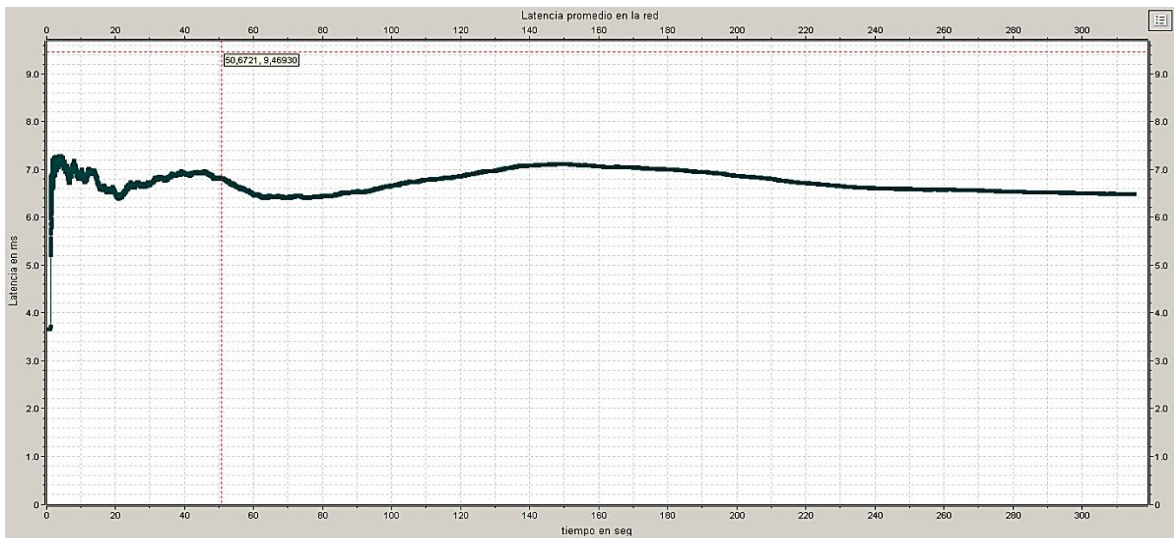


Figura 4.34 Latencia promedio modelo VANET 50 nodos

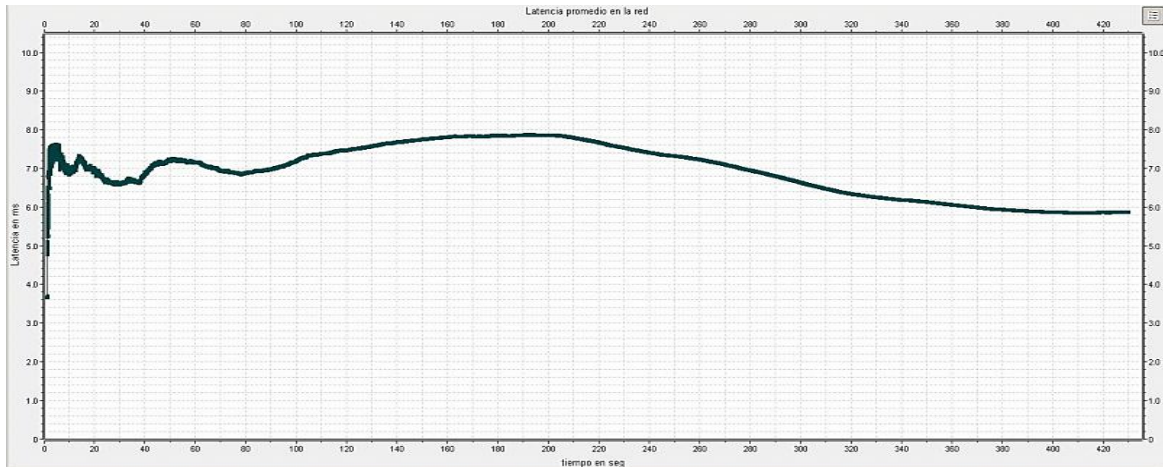


Figura 4.35 Latencia promedio modelo VANET 100 nodos

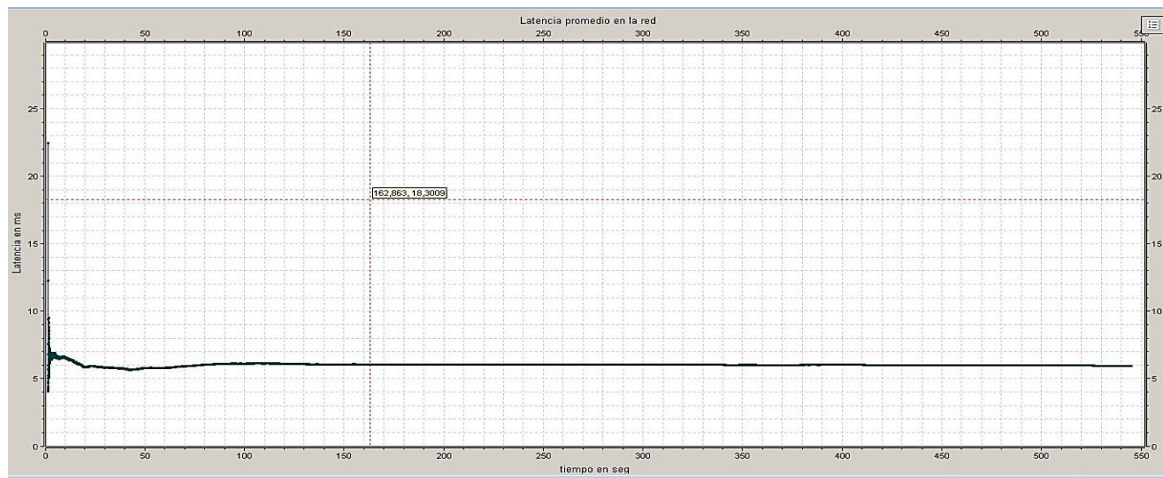


Figura 4.36 Latencia promedio modelo VANET 150 nodos

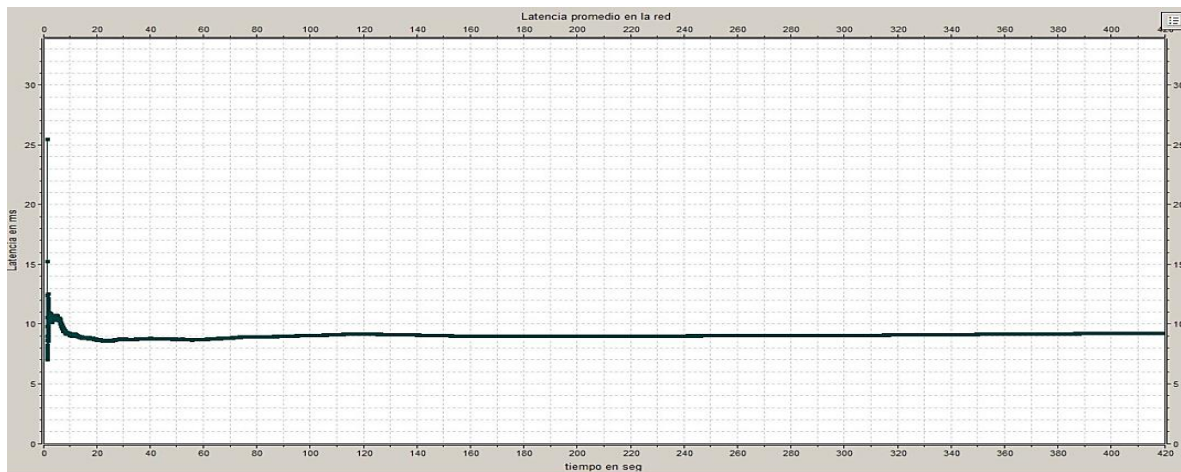


Figura 4.37 Latencia promedio modelo VANET 200 nodos



Las Figura 4.28, 3.29, 3.30, 3.31 y 3.32 muestra la latencia del modelo VANET SA/PC, las Figura 4.33, 3.34, 3.35, 3.36 y 3.37 muestran la latencia obtenida en el modelo VANET. Las aplicaciones SWA permiten una latencia máxima de 100 ms, la cual no se ve afectada considerablemente en ninguno de los dos modelos. Tampoco se supera el límite de latencia permitida por lo que en términos de QoS, ambos modelos cumplen con estos requerimientos.

Sin embargo en los primeros 10 segundos de simulación se observa unos picos en la latencia, estos se deben a que la red empieza a inicializarse y aún hay nodos que no han empezado la comunicación ni han recibido los mensajes de control para sincronizar la red.

No se puede asegurar que hay una mejora en el modelo VANET SA/PC con respecto al modelo VANET, sin embargo tampoco hay una desmejora en los tiempos de latencia en el modelo VANET SA/PC. Lo que se puede inferir de este hecho es que los algoritmos de PC y SA no introducen tiempo de latencia adicional al sistema que pueda ser considerado significativo.

4.2.1.4 Uso del canal

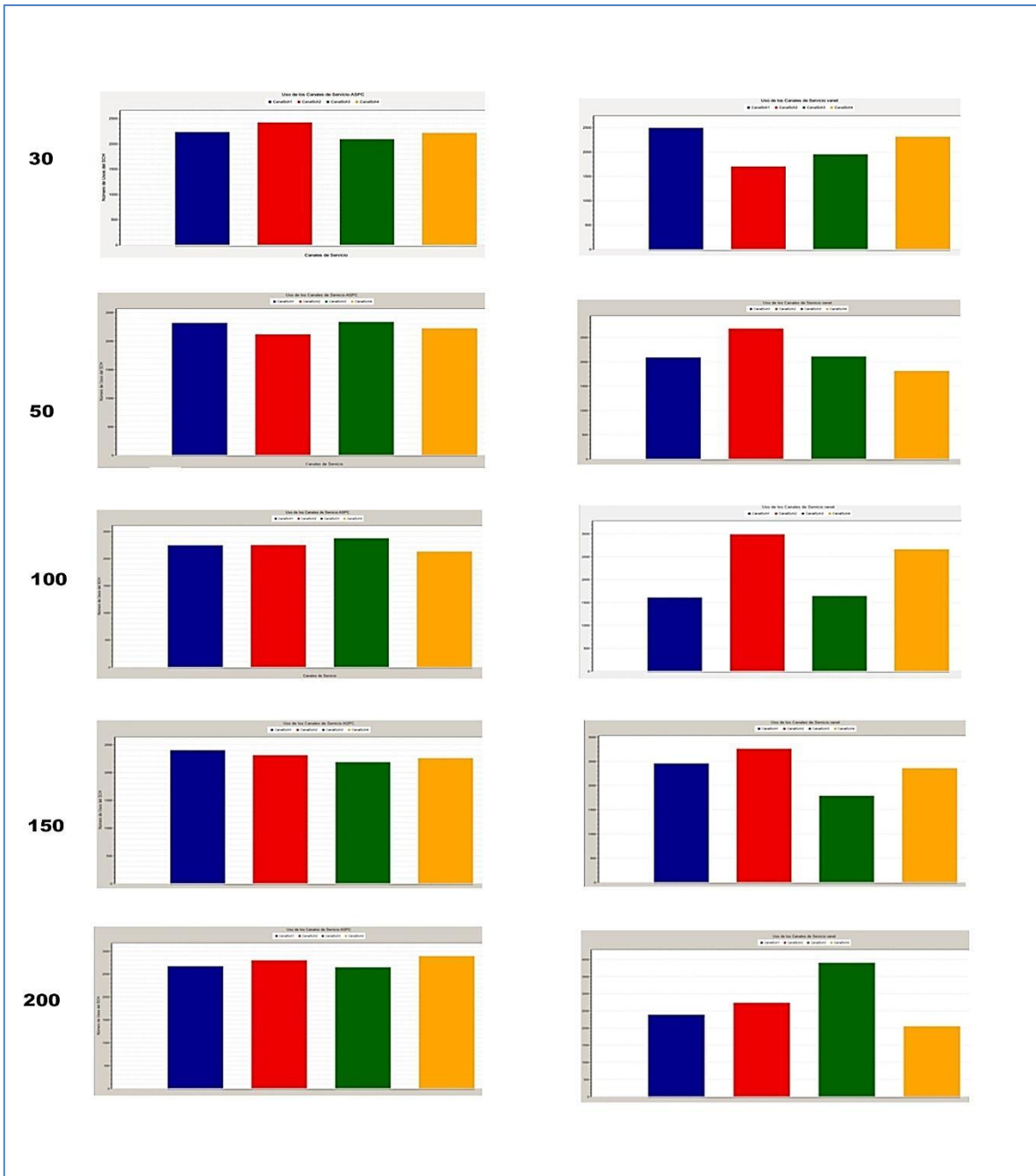


Figura 4.38 Comparación del uso de los canales entre el modelo VANET SA/PC (izquierda) y el modelo VANET (derecha)

La Figura 4.38 muestra la utilización de los canales radio de los modelos VANET SA/PC (a la izquierda) y VANET (a la derecha) para cada caso. En esta se evidencia que el modelo VANET SA/PC distribuye los canales de una manera más equitativa en contraste



con el modelo VANET. De aquí se deduce la importancia de la implementación del algoritmo NACSA ya que asegura que el número de nodos en cada canal se encuentre equilibrado en toda la red gracias a la colaboración que hay entre los nodos para comunicar las condiciones de congestión de los canales y el número de usuarios que están atendiendo, de esta forma el algoritmo ayuda mitigar el efecto de interferencia entre los distintos nodos de la red.

Gracias a esta reducción de la interferencia, la red puede atender a un mayor número de nodos, lo que se ve reflejado en el incremento de transmisiones simultáneas e incremento del throughput. Por otro lado al reducir la congestión de nodos en un canal, se reduce los tiempos de *backoff* por lo que los paquetes permanecerán en un menor tiempo de espera incrementando el flujo de información hacia la red.

4.2.1.5 Pérdida de paquetes en la red

Este valor se obtiene del total de paquetes perdidos, dentro de los cuales se incluyen los paquetes perdidos debido a que no alcanzaron el nivel de SINR objetivo (paquetes con errores de bits) más los paquetes perdidos en el instante en que se estaba transmitiendo [41], sobre el total de paquetes recibidos como indica la ecuación (3.1):

$$\text{Porcentaje Paquetes Perdidos} = \frac{\text{Paquetes Errados}}{\text{Total Paquetes Recibidos}} \times 100 \quad (3.1)$$

A medida que crece el número de nodos en la red, también se incrementan los porcentajes de pérdida de paquetes, sin embargo se evidencia en la Tabla 4.6 que para el modelo VANET SA/PC se pierde menos paquetes que para el modelo VANET, demostrando que los procedimientos de SA y PC mejoran el desempeño de la red, permitiendo atender una mayor cantidad de usuarios con una menor degradación de los paquetes.

Número de nodos	Promedio Perdida de Paquetes %	
	VANET	VANET SA/PC
30	12.6	9.4
50	20.8	19.6
100	30	27.6
150	31	28
200	35.2	33.2

Tabla 4.6 Comparación de los porcentajes de pérdida de paquetes en el escenario 1

4.3 EXPERIMENTACIÓN ESCENARIO 2

Para este escenario, se ha implementado la aplicación Comunicaciones de Grupo (GC, *Group Communications*) descrita en la Tabla 4.1. La distribución de proveedores es de 1 a 10, es decir, por cada 10 vehículos existe un proveedor. La Tabla 4.7 muestra el número de nodos de cada simulación, el número de proveedores y el tiempo de simulación. Se consideraron diferentes tiempos de simulación para cada caso debido al tiempo de establecimiento de los nodos en la red.

	Número de nodos	de	Número de proveedores	de	Tiempo de Simulación [segundos]
Caso 1	30		3		270
Caso 2	50		5		315
Caso 3	100		10		430
Caso 4	150		15		550
Caso 5	200		20		740

Tabla 4.7 Configuración del escenario 2

4.3.1 Presentación y Análisis de resultados

4.3.1.1 Transmisiones simultáneas

En este escenario, se ha cambiado la prioridad de los mensajes a la más baja, por lo que la duración de AIFS para las aplicaciones GC tiene una duración de 150us [9]. Esto se debe a que el retardo no es tan crítico en este tipo de aplicaciones en contraparte con las aplicaciones de seguridad vial.

a) Modelo VANET SA/PC

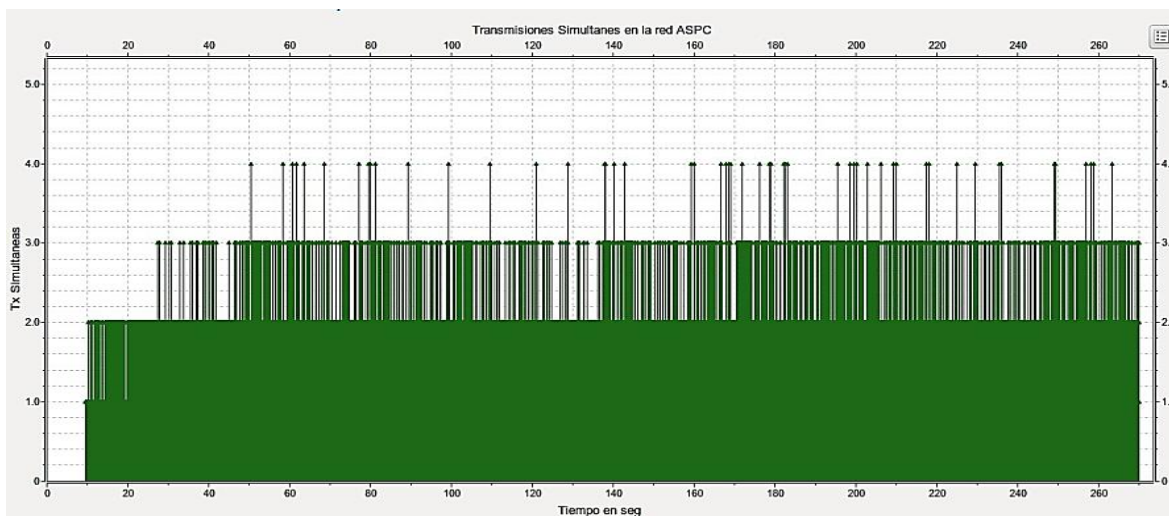


Figura 4.39 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 30 nodos

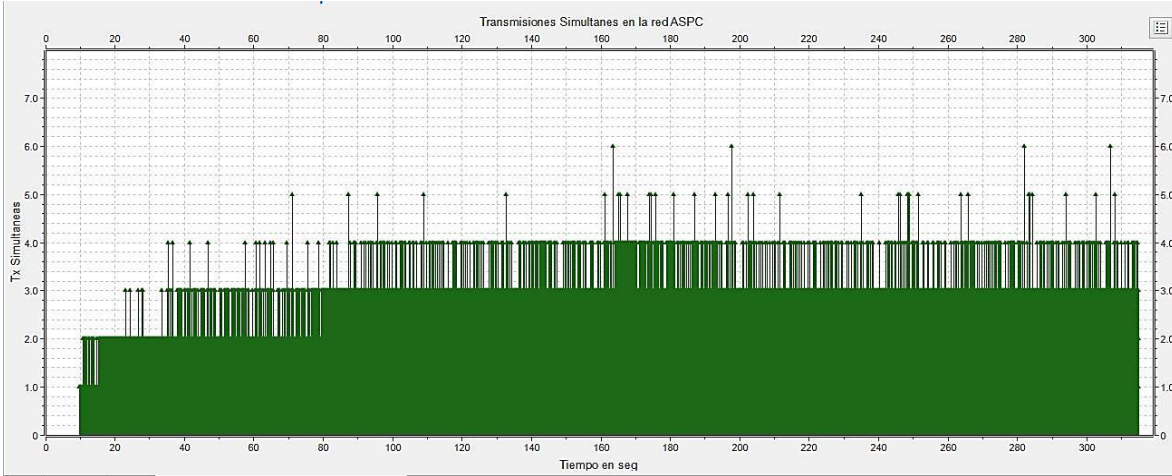


Figura 4.40 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 50 nodos

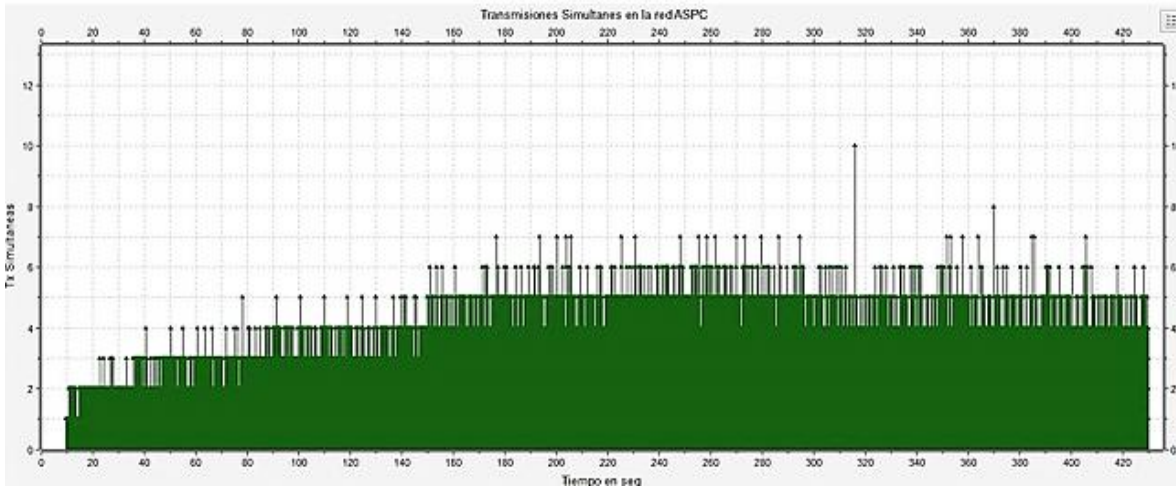


Figura 4.41 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 100 nodos

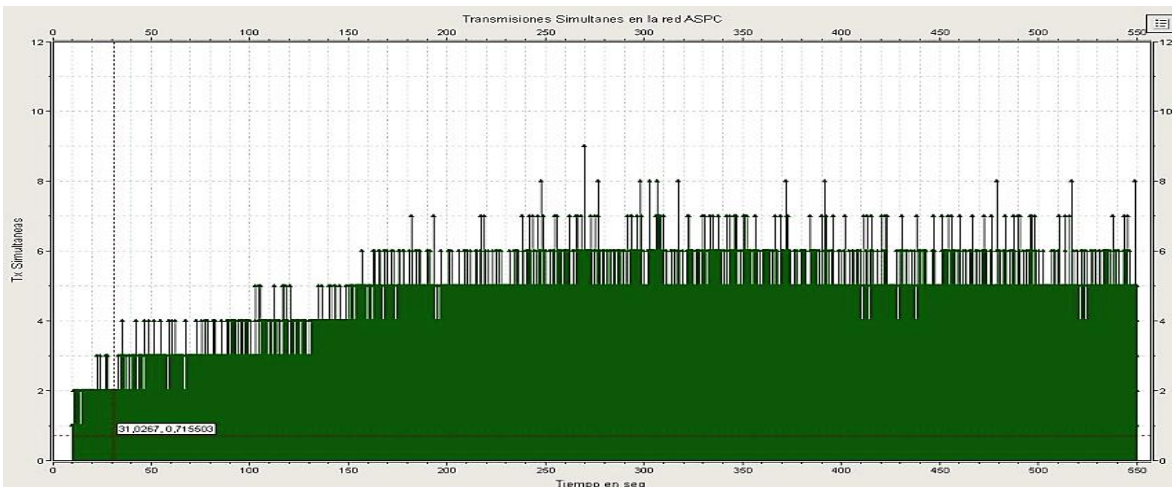


Figura 4.42 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 150 nodos

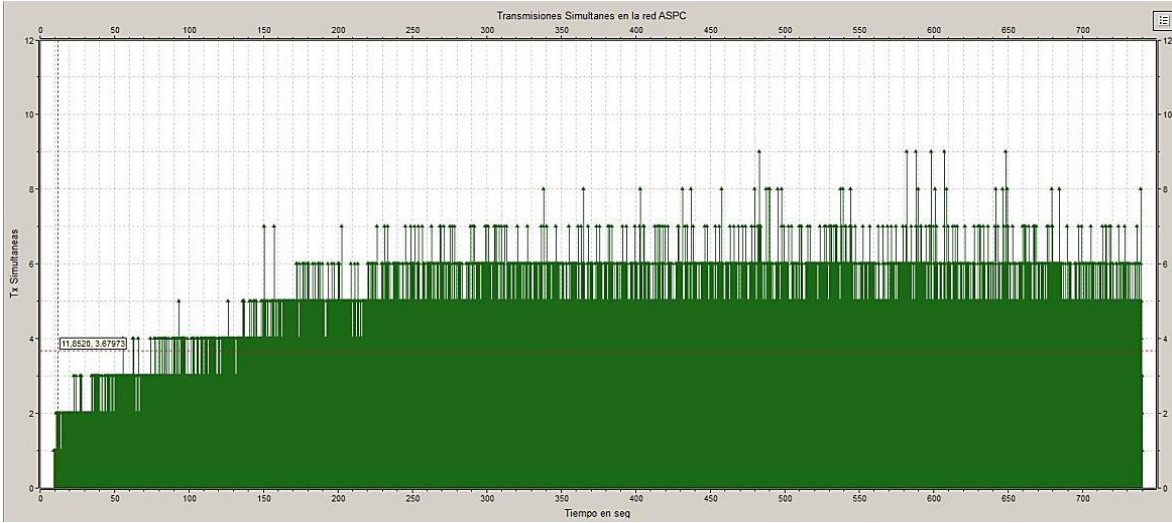


Figura 4.43 Transmisiones simultáneas modelo VANET SA/PC 200 nodos

b) Modelo VANET

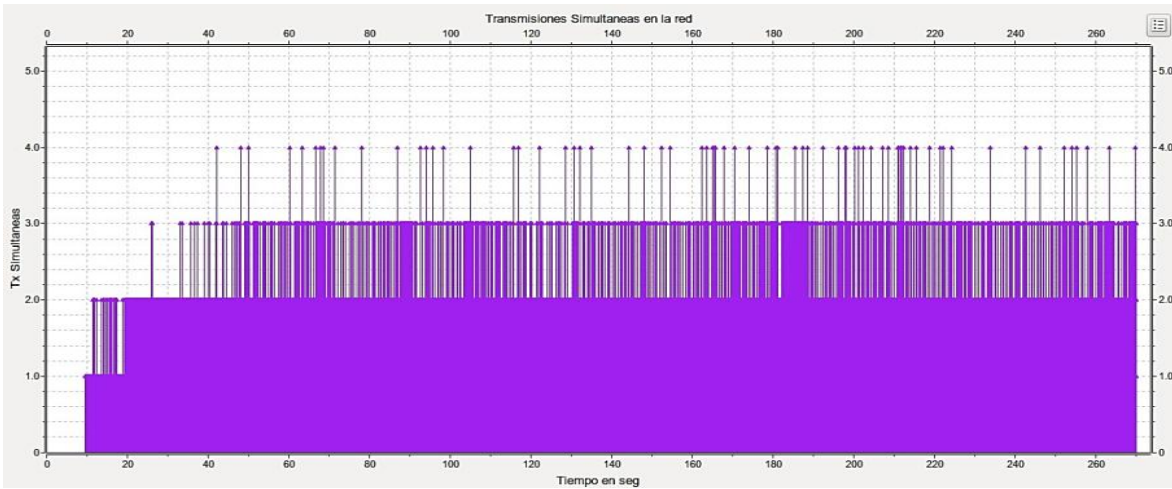


Figura 4.44 Transmisiones simultáneas modelo VANET 30 nodos

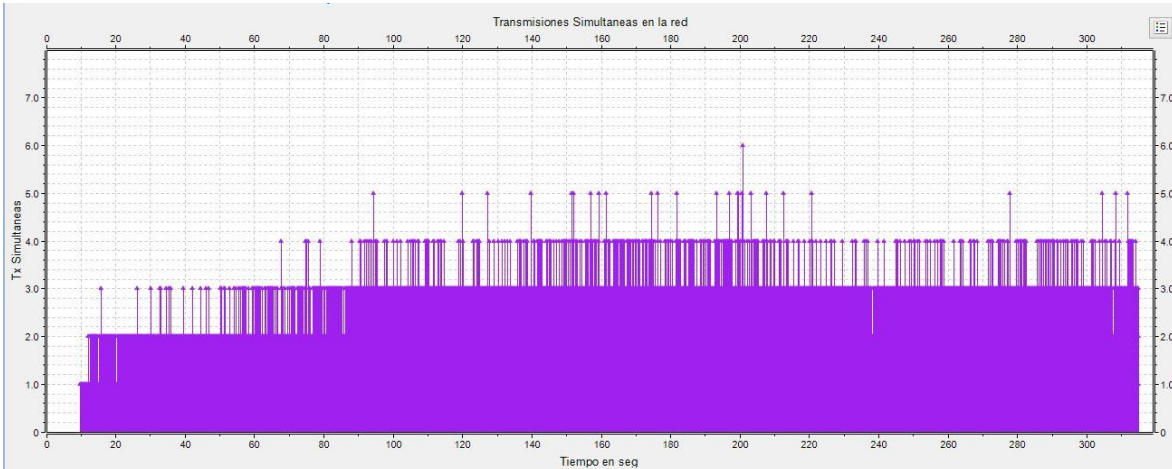


Figura 4.45 Transmisiones simultáneas modelo VANET 50 nodos

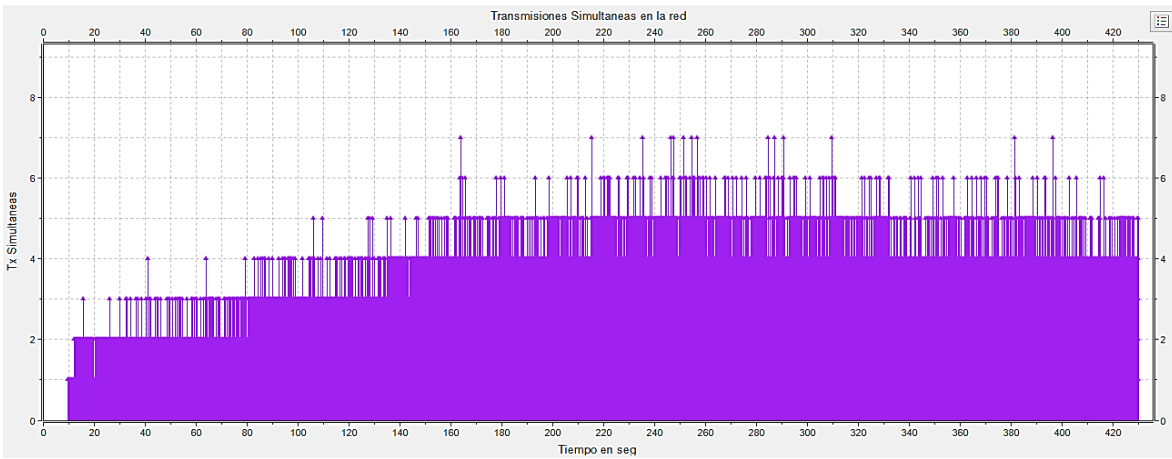


Figura 4.46 Transmisiones simultáneas modelo VANET 100 nodos

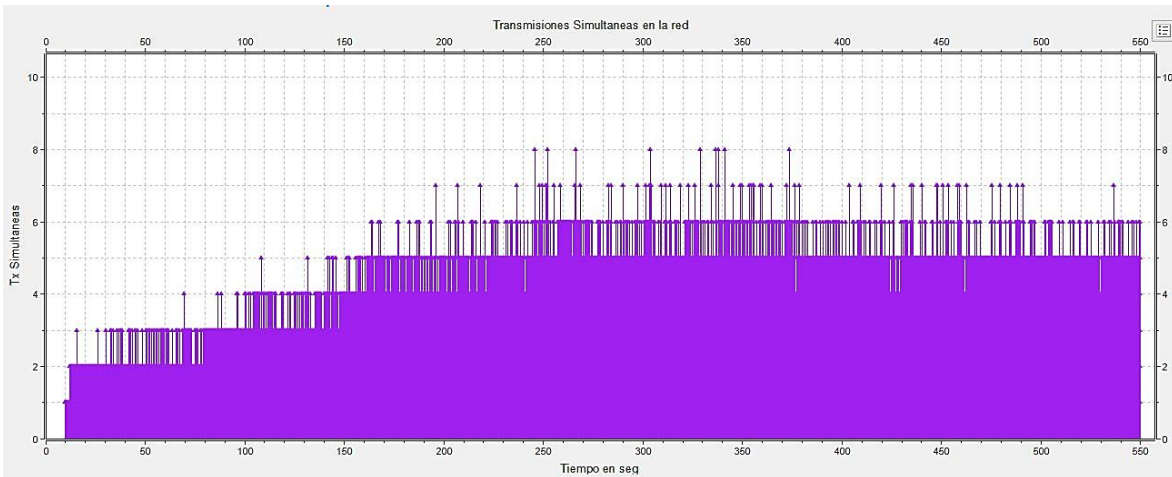


Figura 4.47 Transmisiones simultáneas modelo VANET 150 nodos

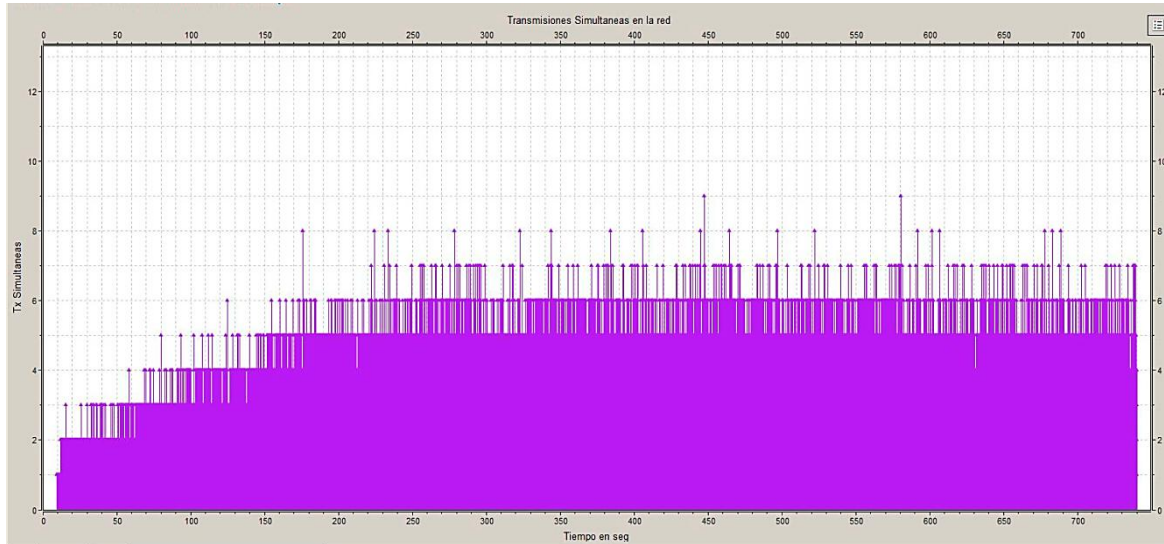


Figura 4.48 Transmisiones simultáneas modelo VANET 200 nodos

Las Figuras 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 y 4.43 muestran las transmisiones simultáneas obtenidas en el modelo VANET SA/PC, estas se comparan con las transmisiones simultáneas obtenidas en el modelo VANET las cuales se exponen en las Figuras 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 y 4.48. Los resultados de las simulaciones de los modelos VANET SA/PC y VANET tienen un comportamiento similar a los obtenidos en el escenario 1, es decir el número de transmisiones simultáneas se incrementa cuando aumenta el número de nodos, siendo el modelo VANET SA/PC quien tiene un mayor número de transmisiones simultáneas.

En las comunicaciones GC existe un proveedor por cada cierto número de usuarios lo cual lleva a la formación de pequeñas celdas móviles entre vehículos cercanos (aunque cabe la posibilidad de que nodos lejanos se unan al grupo de comunicaciones), los cuales operan en el mismo canal e intercambian mensajes con los nodos proveedor, lo cual hace que la interferencia entre estos nodos sea inevitable. Sin embargo MCA ayuda a mitigar el impacto de la misma entre nodos de diferentes celdas al controlar el tamaño de estas por medio del PC, pues uno de los objetivos de MCA es reducir el área de servicio de un nodo a un área mínima de servicio efectiva [24]. De la misma forma NACSA ayuda a mejorar el reuso de canal entre las distintas celdas lo cual se ve reflejado en la superioridad del número de transmisiones simultáneas en el modelo VANET SA/PC, en contraparte con el modelo VANET en simulaciones con el mismo número de nodos; puesto que al reducirse la interferencia se aumenta la probabilidad de que un nodo encuentre el canal libre y de esta forma sean atendidos un mayor número de nodos en la red.

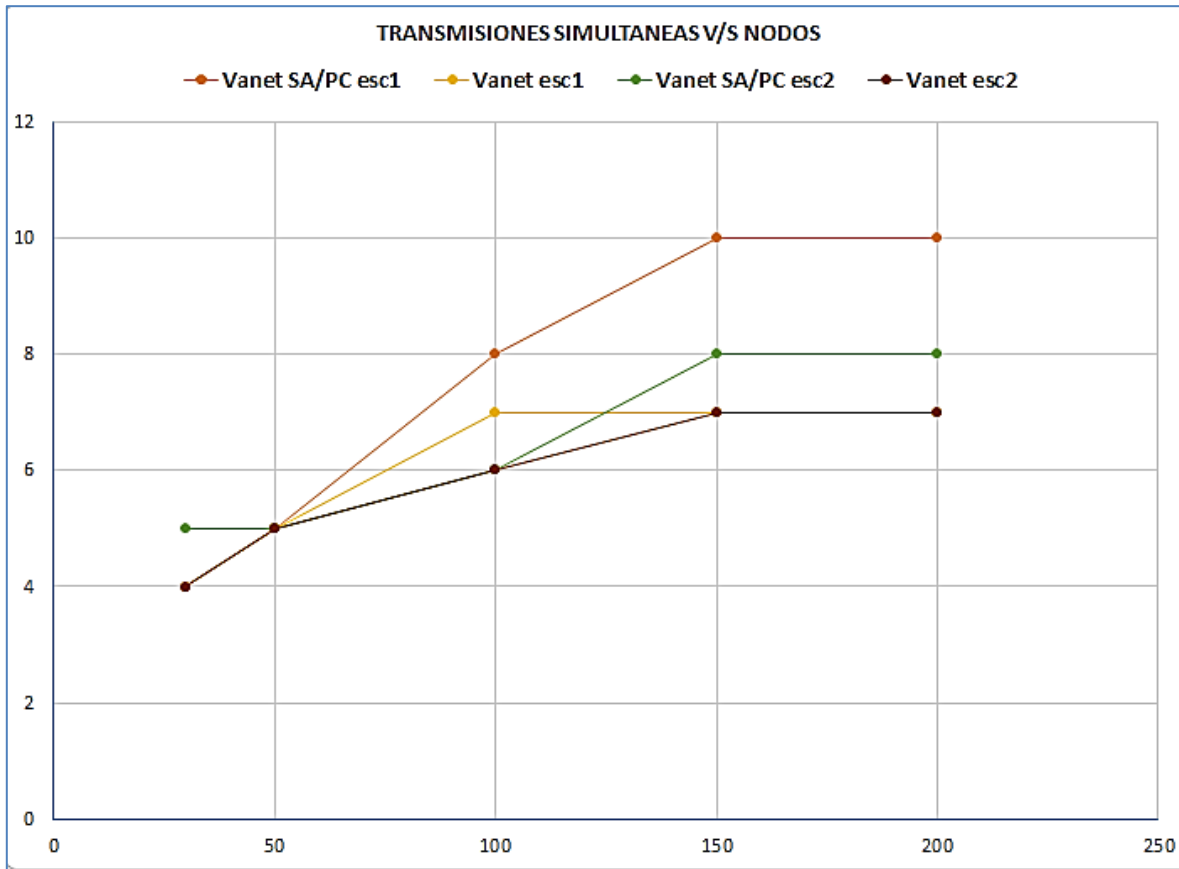


Figura 4.49 Transmisiones simultaneas vs nodos

En la Figura 4.49 se sintetizan los resultados obtenidos en los Escenarios 1 y 2 en lo referente a transmisiones simultaneas, en esta se puede observar que en ambos escenarios el número de transmisiones simultaneas del modelo VANET SA/PC es mayor al modelo VANET, lo que se interpreta como una mayor capacidad en el modelo que implementa procedimientos de SA y PC para atender un mayor número de nodos simultáneamente.

El modelo VANET tiende a un límite de siete transmisiones simultáneas en ambos escenarios, en contraparte con en el modelo VANET SA/PC que supera este límite sin dificultad, siendo este valor mayor en el escenario 1 que en el escenario 2. Está claro que al manejar una única potencia para realizar todas las transmisiones y escoger un SCH sin tener en cuenta las condiciones de la red, no trae ningún beneficio para una red en constante movilidad, pues se ve una menor habilidad para adaptarse a los cambios de topología, una menor habilidad para reducir la interferencia de la red y por tanto una menor capacidad para transmitir simultáneamente. Con esto se puede determinar que los procedimientos de PC y SA aumentan la capacidad de la red pues permite un mayor número de transmisiones simultáneas con respecto a una red que no realiza estos procedimientos.

Por otra parte la diferencia de resultados de la capacidad entre el primer escenario y el segundo se debe en gran medida a las condiciones particulares de cada escenario (en cuanto a la distribución de proveedores-usuarios) y de las prioridades de los mensajes en cada servicio. A pesar de que el intervalo de simultaneidad sea mayor en el escenario 2, lo que llevaba a suponer que tendría un mayor número de transmisiones simultáneas, también aumentaba la competencia de los nodos por acceder a un canal, lo que incrementaba los tiempos de *backoff* en la capa MAC. Por otra parte la prioridad baja del mensaje hacia que el proceso de EDCA asignara mayores tiempos de contienda en la capa MAC, retrasando las transmisiones de los nodos hacia la red.

4.3.1.2 Throughput

a) Modelo VANET SA/PC

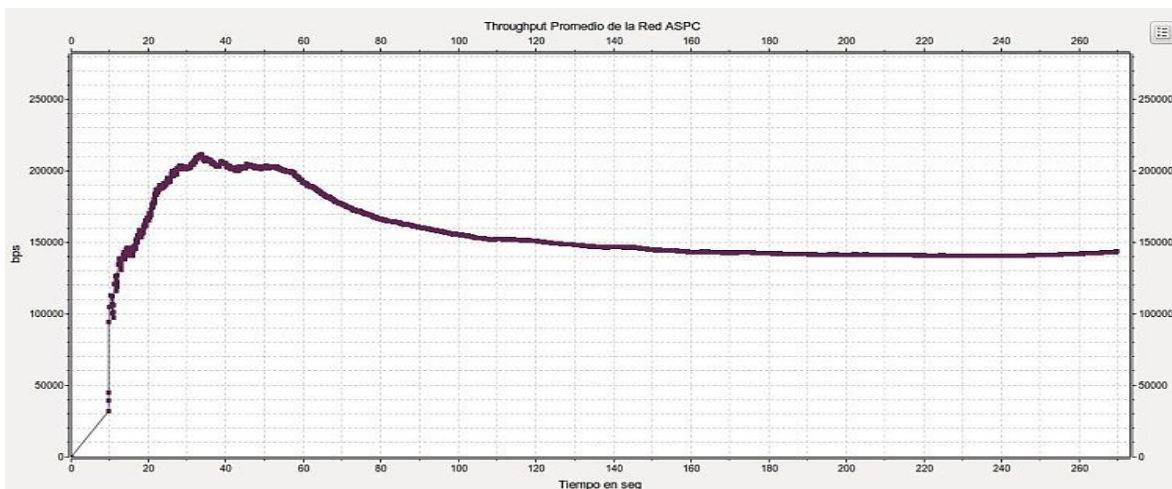


Figura 4.50 Throughput modelo VANET SA/PC 30 nodos

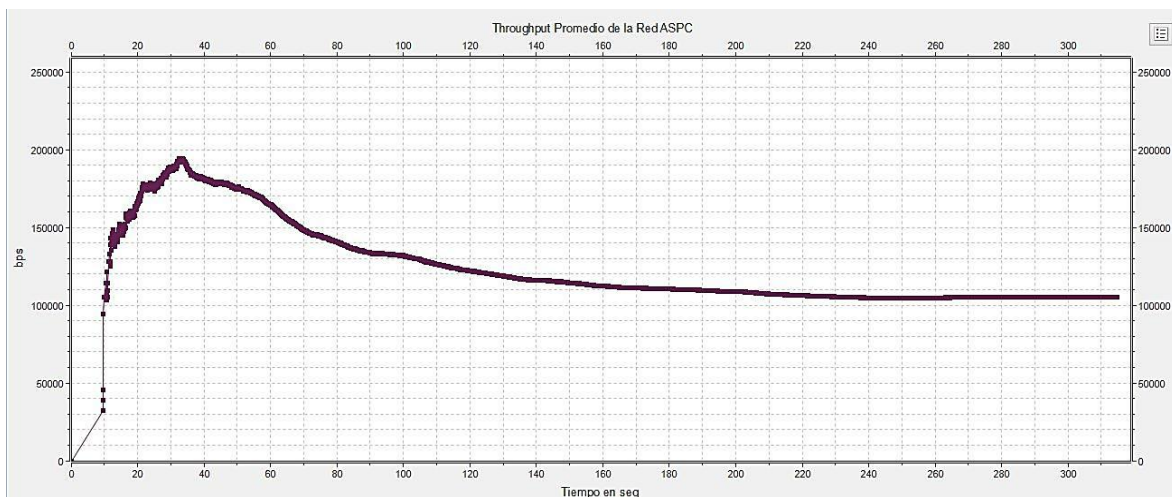


Figura 4.51 Throughput modelo VANET SA/PC 50 nodos

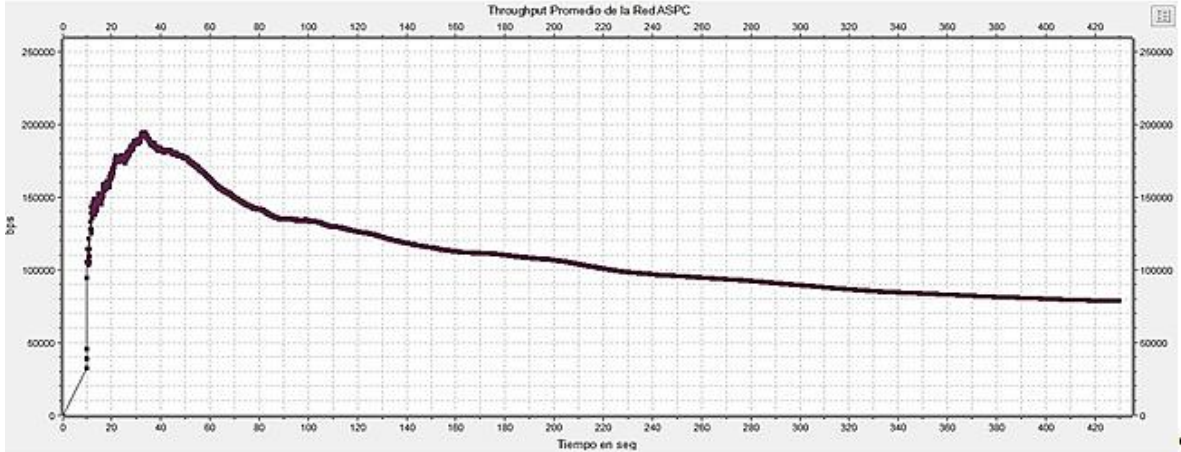


Figura 4.52 Throughput modelo VANET SA/PC 100 nodos

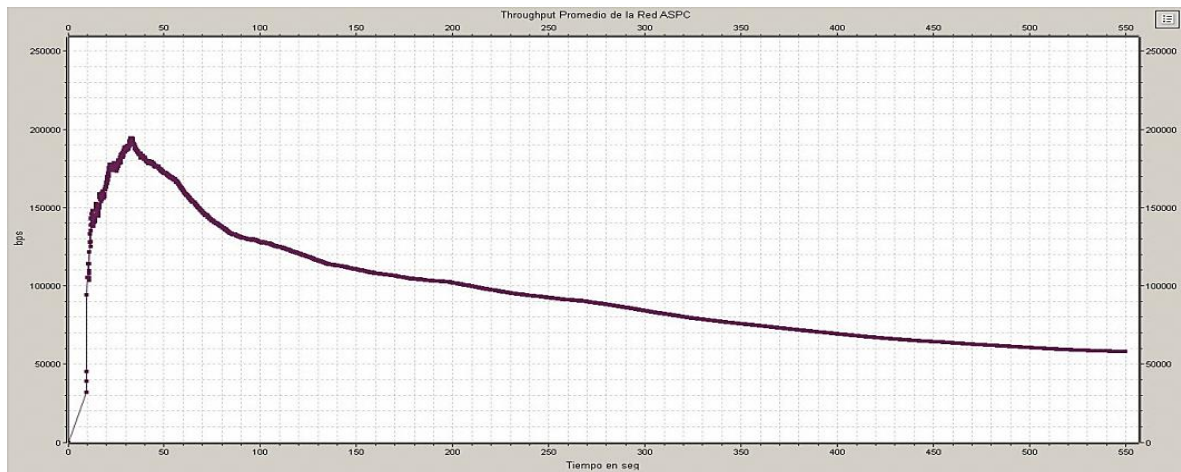


Figura 4.53 Throughput modelo VANET SA/PC 150 nodos

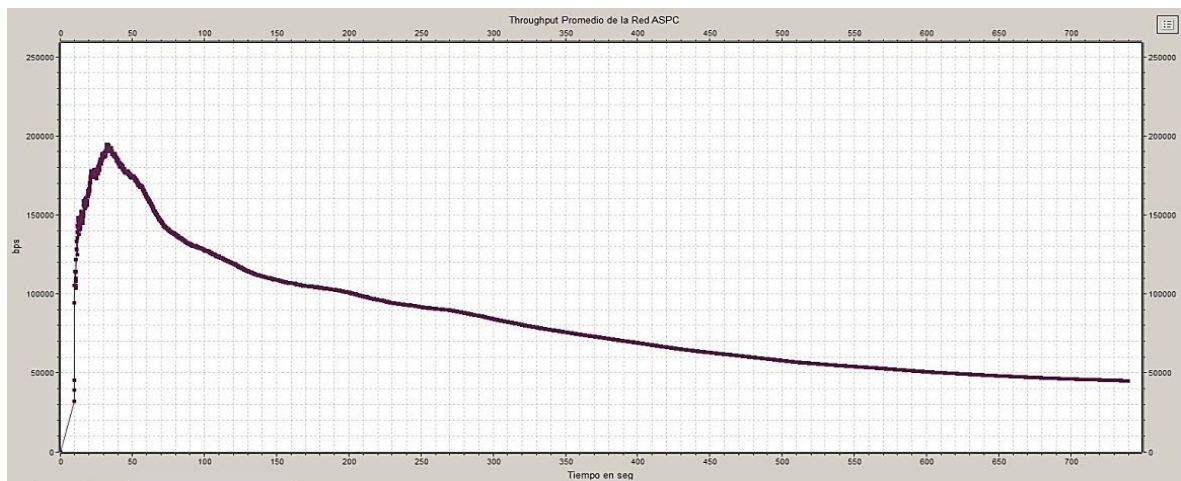


Figura 4.54 Throughput modelo VANET SA/PC 200 nodos



b) Modelo VANET

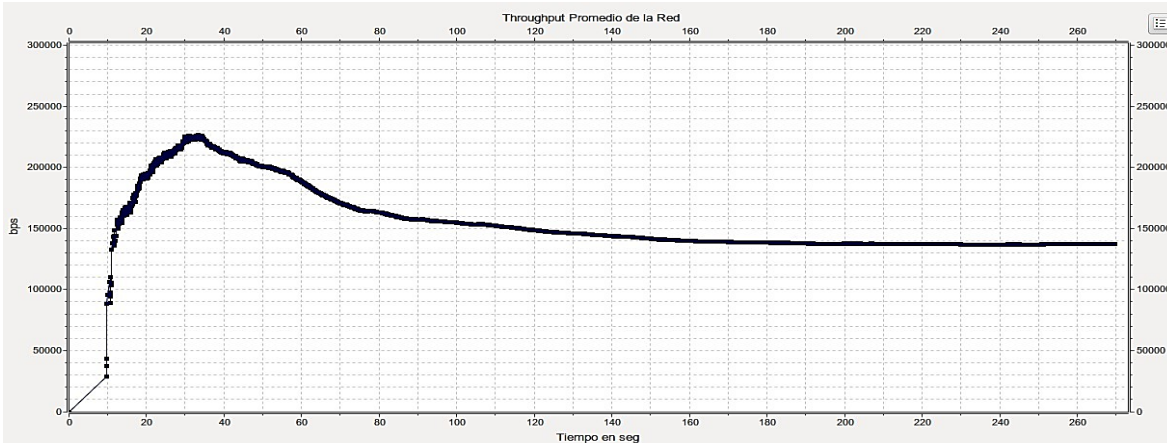


Figura 4.55 Throughput modelo VANET 30 nodos

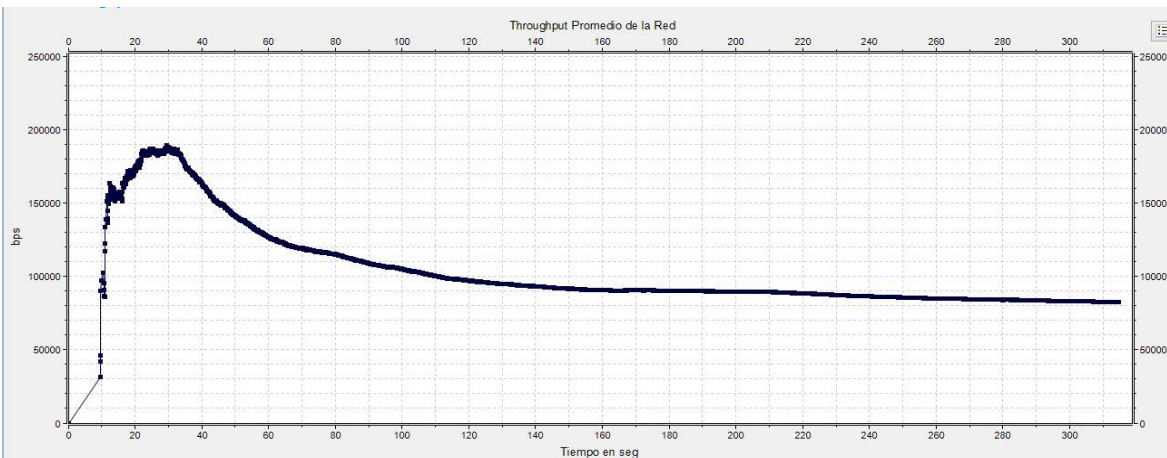


Figura 4.56 Throughput modelo VANET 50 nodos

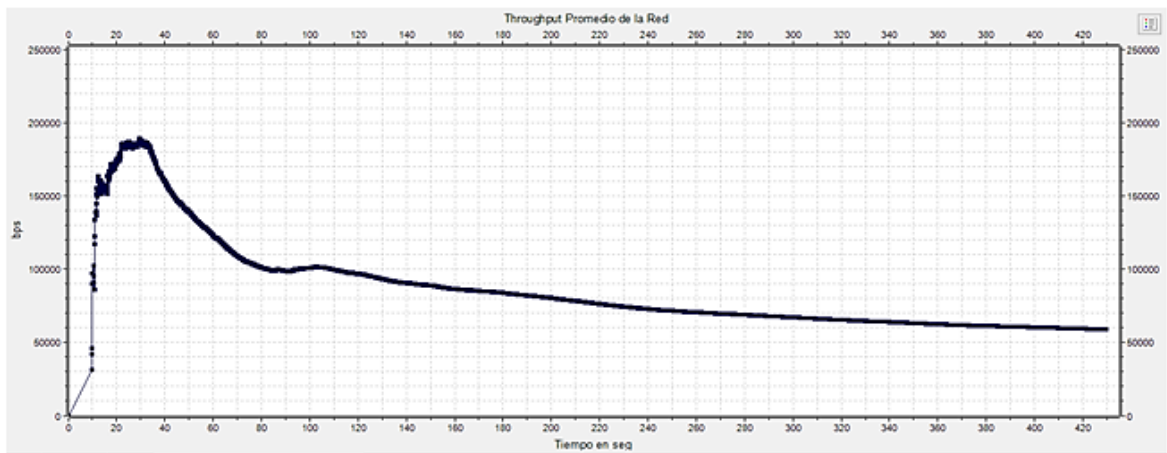


Figura 4.57 Throughput modelo VANET 100 nodos

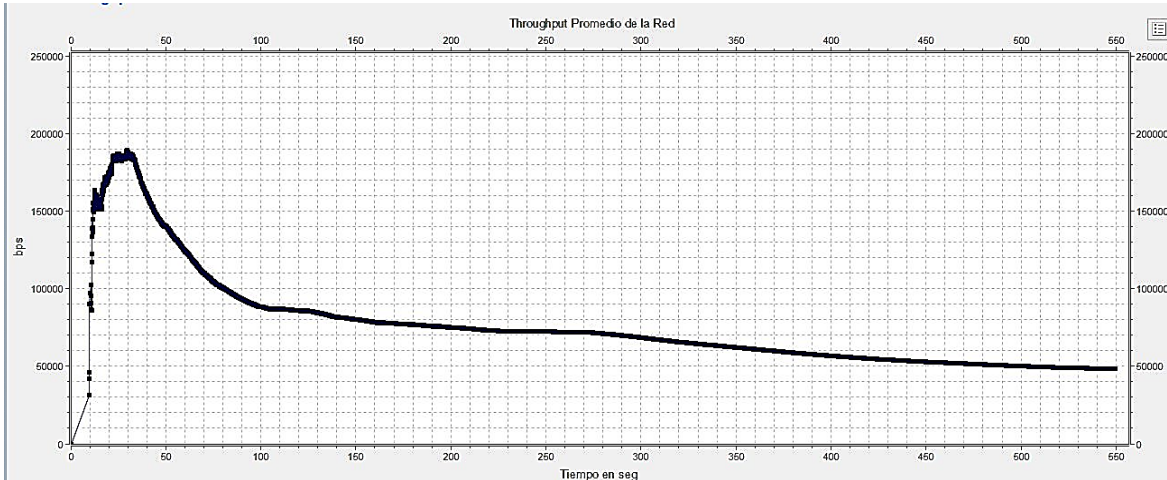


Figura 4.58 Throughput modelo VANET 150 nodos

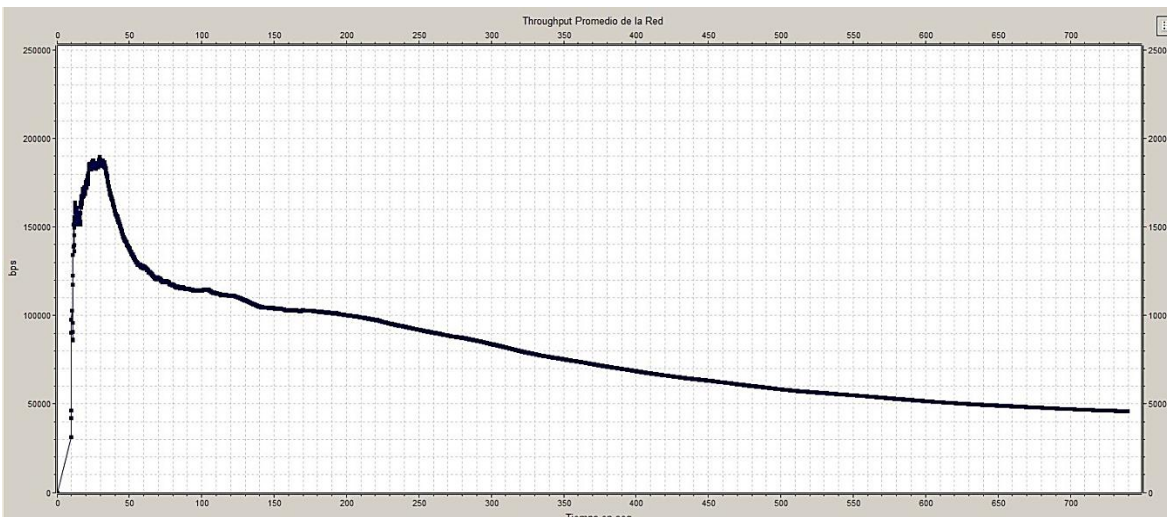


Figura 4.59 Throughput modelo VANET 200 nodos

En las comunicaciones GC el *throughput* es inversamente proporcional al número de nodos siendo el modelo VANET SA/PC quien tiene mejor *throughput*. En la Figura 4.60 se sintetizan los resultados obtenidos en los Escenarios 1 y 2 referentes al *throughput*

Una diferencia importante de este segundo escenario, es el aumento significativo del *throughput* con respecto al primer escenario, aún a pesar de que el número de transmisiones simultáneas sea menor en este escenario. Este aumento de *throughput* se puede explicar si se tiene en cuenta que los proveedores están recibiendo un mayor volumen de datos por parte de los múltiples usuarios que están suscritos a su servicio, lo que aumentaría el promedio de *throughput* en la red.

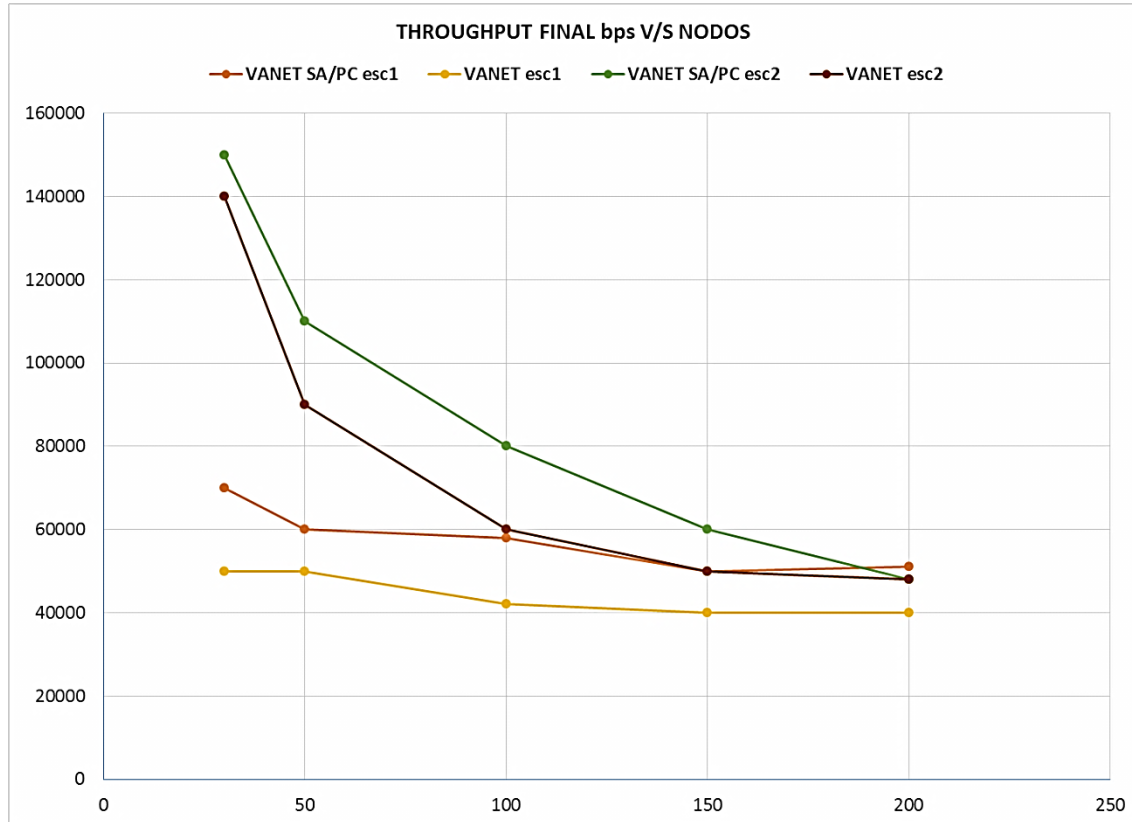


Figura 4.60 Throughput vs Nodos

A diferencia del escenario 1, en el escenario 2 el *throughput* cae rápidamente (casi de manera exponencial) a medida que el número de nodos se incrementa, esto se debe en parte a la congestión de los proveedores, ya que se aumenta el tiempo de procesamiento de los mensajes como se ha explicado en los apartados anteriores. Por otra parte se ve una convergencia de valores en ambos modelos cuando el número de nodos es igual a 200, lo que significaría que la congestión, la interferencia y la pérdida de paquetes serían demasiado altas como para poder ser mitigadas solamente con los algoritmos NACSA y MCA. Se puede interpretar que a partir de los 200 nodos el modelo VANET SA/PC tiende a comportarse de igual que al modelo VANET, llegados a este punto la red no puede mejorar más en cuanto a desempeño se refiere, sin embargo los procedimientos de SA y PC hacen que la degradación de la red sea más lenta y de menor grado, con respecto a un modelo que no implementa estos procedimientos.

4.3.1.3 Latencia

A continuación se muestran los resultados de la latencia para este segundo escenario donde se contrastan los valores del modelo VANET SA/PC con respecto al modelo VANET.

Las Figura 4.61, 3.62, 3.63, 3.64 y 3.65 muestra la latencia del modelo VANET SA/PC, las Figura 4.66, 3.67, 3.68, 3.69 y 3.70 muestran la latencia obtenida en el modelo VANET. Las aplicaciones GC permiten una latencia máxima de 500 ms, la cual no se ve afectada considerablemente en ninguno de los dos modelos.

a) Modelo VANET SA/PC

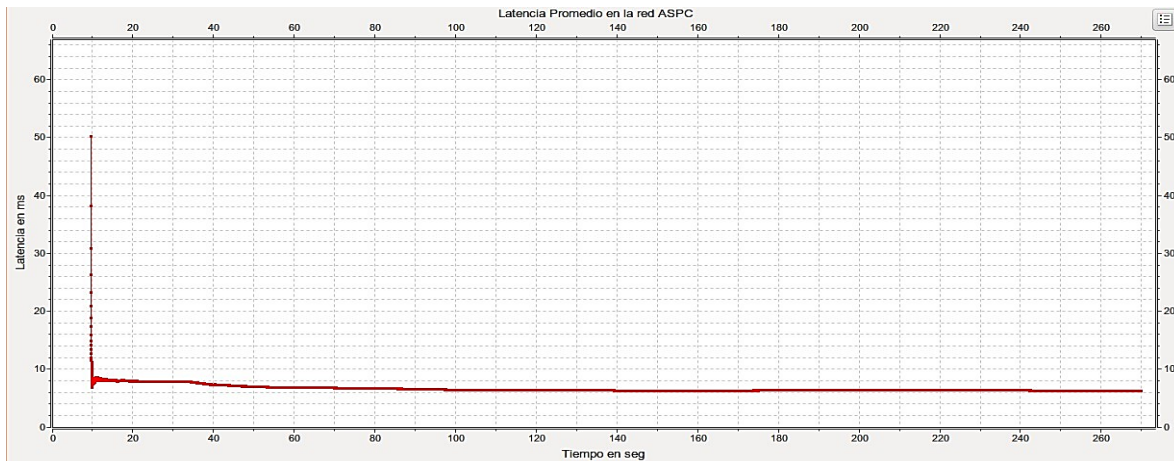


Figura 4.61 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 30 nodos

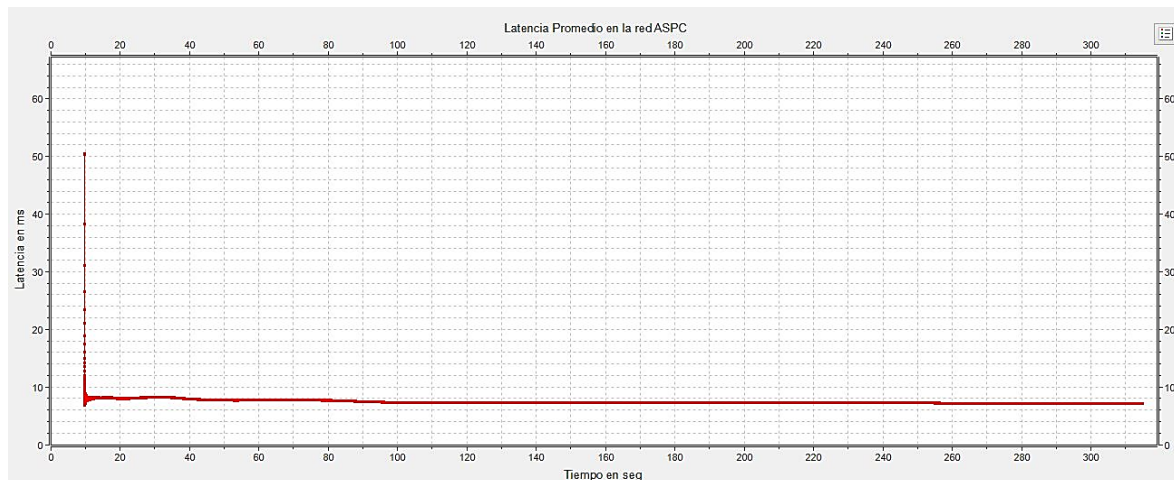


Figura 4.62 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 50 nodos

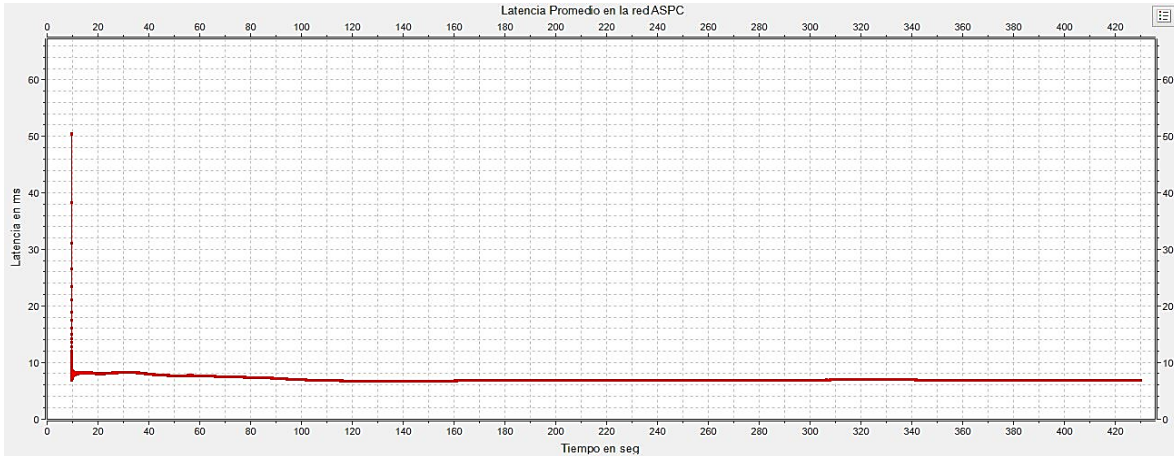


Figura 4.63 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 100 nodos

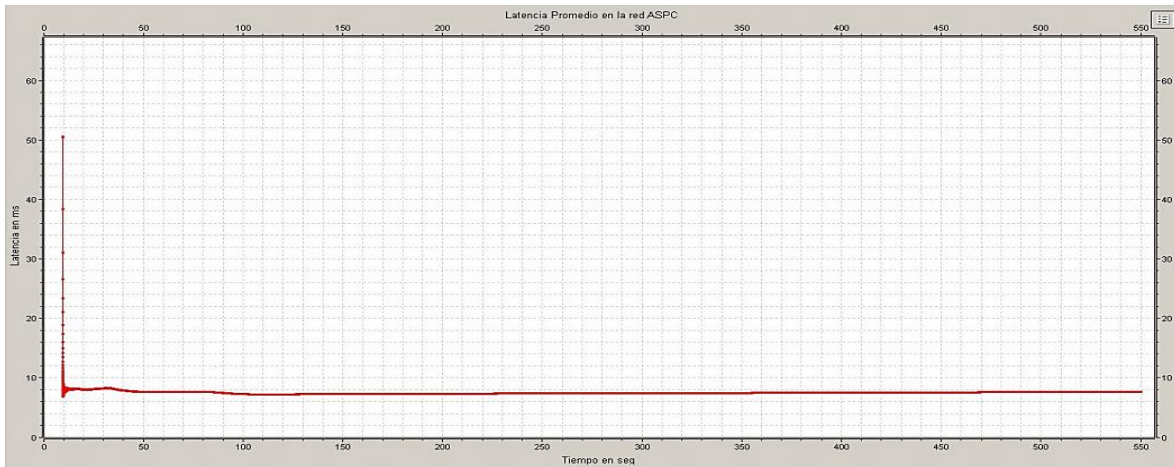


Figura 4.64 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 150 nodos

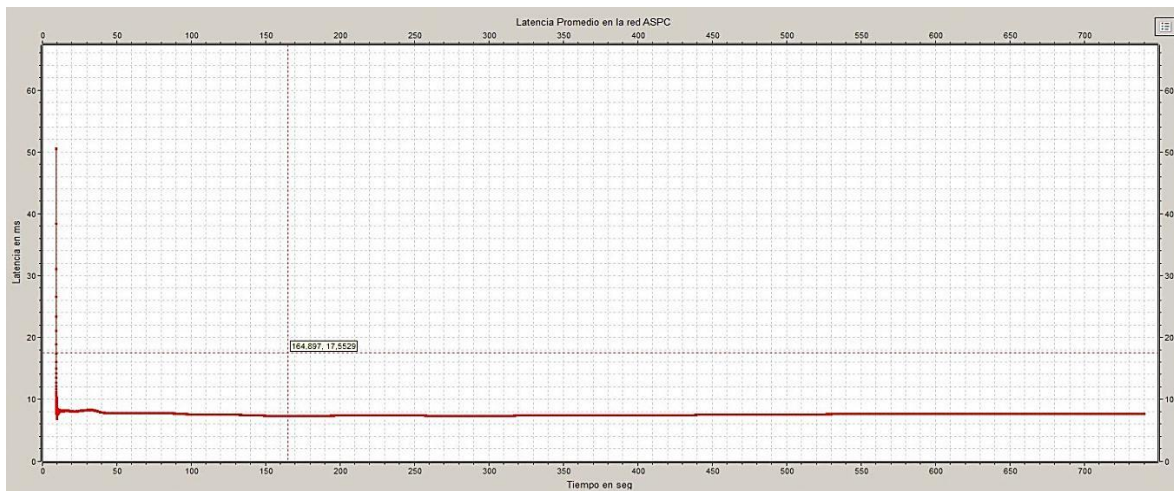


Figura 4.65 Latencia promedio modelo VANET SA/PC 200 nodos



b) Modelo VANET

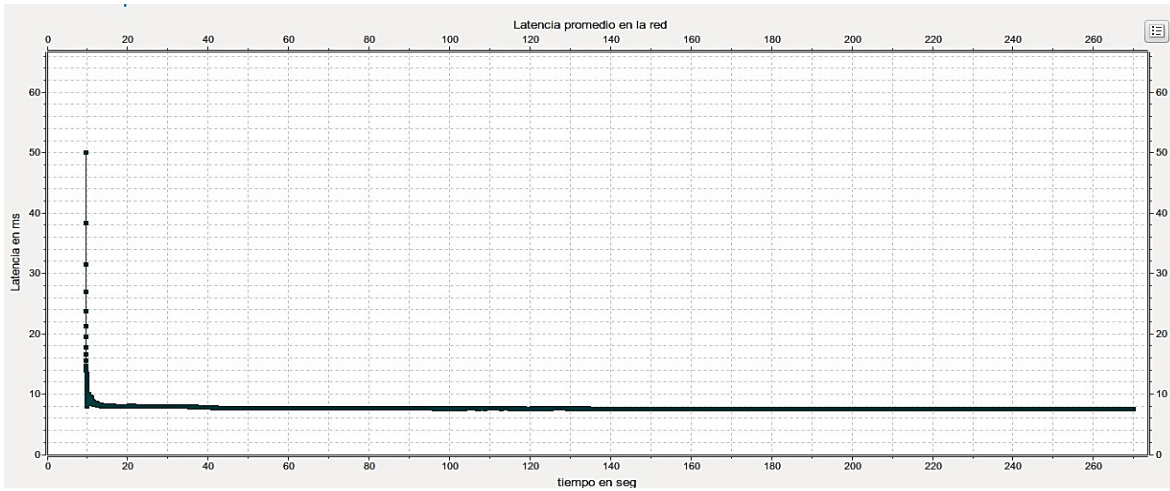


Figura 4.66 Latencia promedio modelo VANET 30 nodos

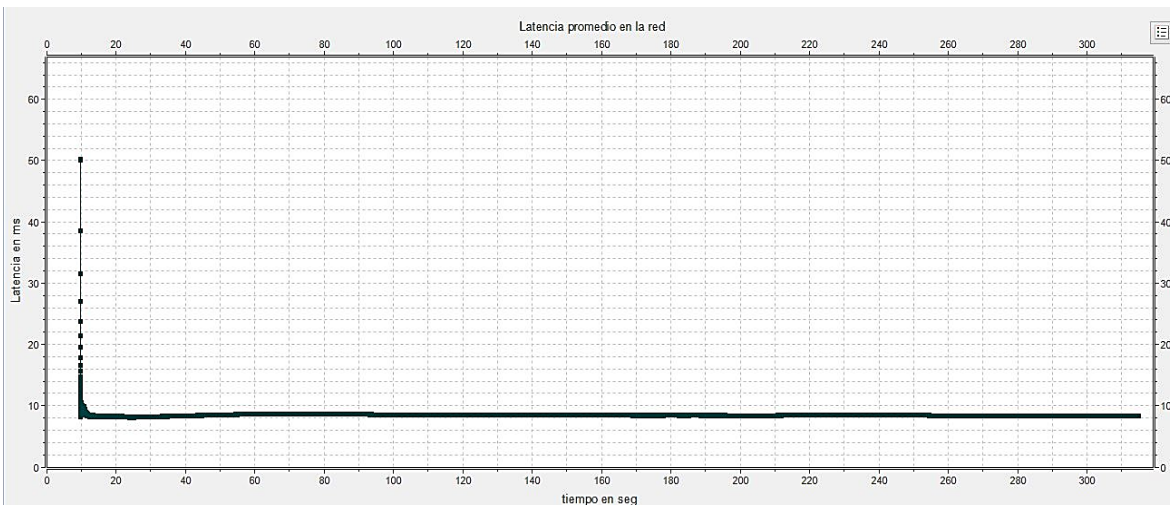


Figura 4.67 Latencia promedio modelo VANET 50 nodos

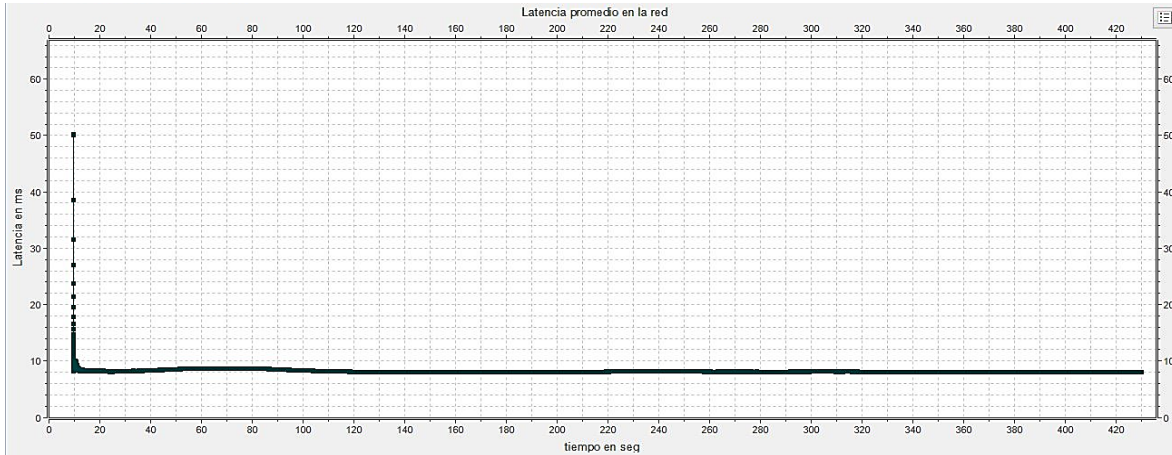


Figura 4.68 Latencia promedio modelo VANET 100 nodos

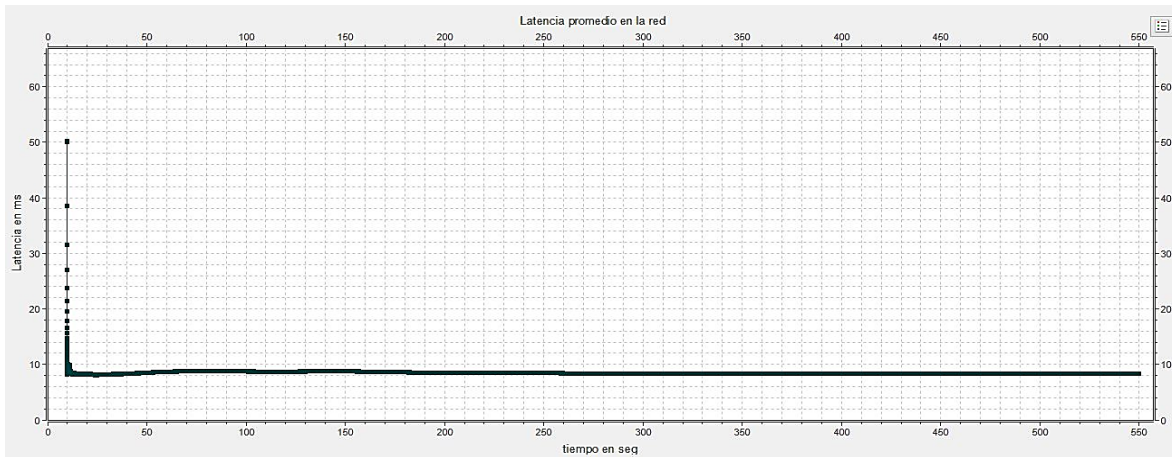


Figura 4.69 Latencia promedio modelo VANET 150 nodos

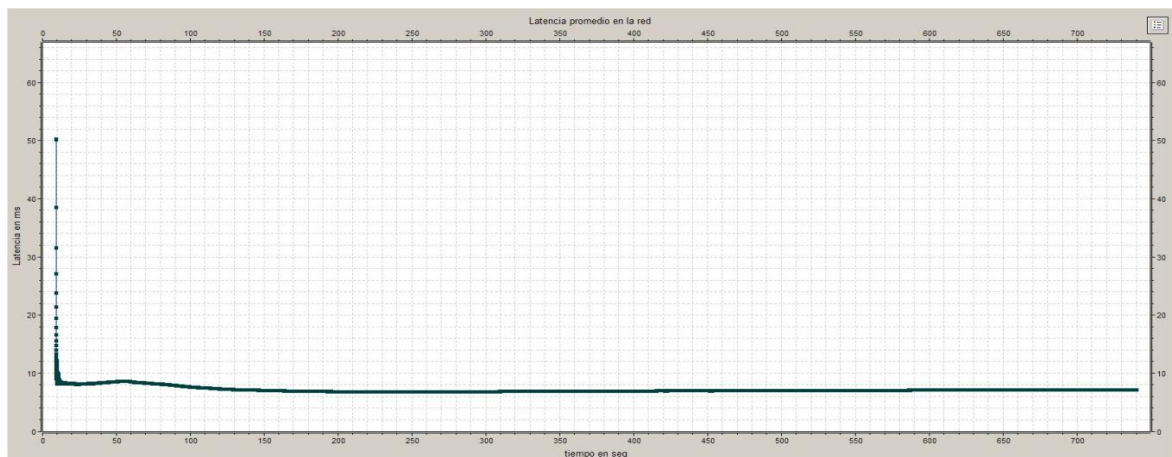


Figura 4.70 Latencia promedio modelo VANET 200 nodos



Al igual que el análisis del primer escenario, los algoritmos de PC y SA no introducen un retardo adicional importante, por otra parte los valores si bien fluctúan entre los 6 ms y 9 ms en ambos modelos y en todos los escenarios, no hay diferencias importantes entre un modelo y el otro, por lo que la latencia no es un parámetro que se vea afectado por el aumento del número de nodos.

4.3.1.4 Uso del canal

La Figura 4.71 muestra la utilización de los canales de radio de los modelos VANET SA/PC (izquierda) y VANET (derecha) para cada caso, en esta se evidencia que el modelo VANET SA/PC si bien no distribuye de una forma más equitativa la congestión de los canales, procura que no hayan canales subutilizados o muy congestionados como sucede en el modelo VANET.

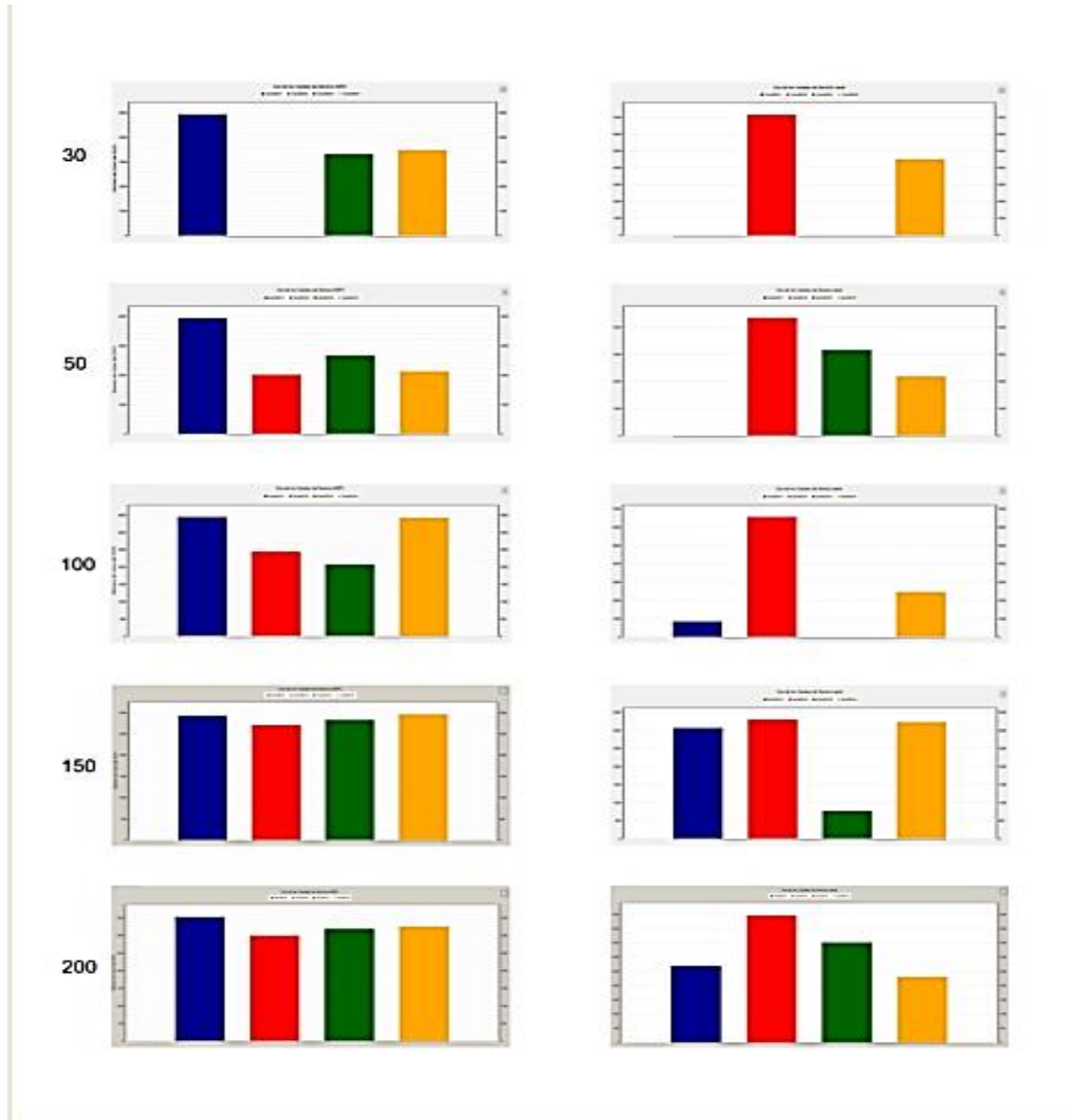


Figura 4.71 Comparación del uso de los canales entre el modelo VANET SA/PC (izquierda) y el modelo VANET (derecha)

El nodo proveedor es el encargado de seleccionar el canal por el cual se establece el servicio, esto hace que la selección de canal tenga un mayor impacto en el despliegue del servicio GC en contraparte con SWA. Si la selección se hace forma estática como se hace en el modelo VANET se puede dar el caso de subutilizar algunos canales o incluso llegar a no utilizarlos como se aprecia en la Figura 4.71 (parte derecha) para los casos de 30, 50 100 nodos; de ahí la importancia del uso del algoritmo NACSA pues este ayuda a una mejor distribución del tráfico en la red sobre los diferentes SCH, ayudando así a mitigar el efecto de interferencia y disminuir la probabilidad de colisión.



NACSA escogerá un canal diferente al que inicia por defecto siempre y cuando encuentre otro canal que le ofrezca una menor congestión, si este nodo proveedor decide pasarse con todos sus usuarios. En caso contrario equivale a decir que el otro canal estará más congestionado si el proveedor se pasara con todos sus usuarios, por otro lado si las condiciones siguen iguales al pasarse de un canal a otro, el algoritmo considerara que es innecesario realizar tal cambio de canal. La Figura 4.71 para el caso de 30 y 50 nodos representa con más claridad dicho suceso.

Como se ve claramente para el modelo VANET SA/PC utiliza tan solo 3 canales contra los 2 canales del modelo VANET para el caso de 30 nodos, sin embargo a pesar de haber solo 3 proveedores (solo se pueden utilizar 3 canales al tiempo), NACSA procura que cada proveedor se encuentre en un canal distinto, reduciendo así la congestión en uno de los canales. Lo contrario sucede en el modelo VANET donde existen dos proveedores en el segundo SCH y uno solo en el cuarto, dejando al menos uno de los dos canales con más congestión y los otros dos en desperdicio o sin utilizar. A medida que aumenta el número de nodos, el comportamiento de NACSA se vuelve más equilibrado permitiendo reducir en todos los casos la congestión en los canales y la interferencia cocanal entre los grupos de nodos, permitiendo así un mejor desempeño del modelo VANET SA/PC comparado con el modelo VANET.

4.3.1.5 Porcentaje de pérdida de paquetes

Como se observa en la Tabla 4.8 los porcentajes de pérdida de paquetes son más altos que en el escenario 1, por otra parte se presenta una degradación más rápida en el modelo VANET a medida que crece el número de nodos en la red. Por el contrario el modelo VANET SA/PC posee menores valores de perdida a medida que se incrementan los nodos en la red, aunque al igual que el modelo VANET, sus valores tienden a ser similares en los casos cuando hay 150 y 200 nodos en la red. Se puede decir que al seguir incrementando el número de nodos, ambos modelos tenderán a un mismo valor por lo que en este punto es difícil reducir los porcentajes de pérdidas en el modelo SA/PC.

Número de nodos	Promedio Perdida de Paquetes %	
	VANET	VANET SA/PC
30	28	26
50	42	34.2
100	50.1	45.7
150	51	50.6
200	53.3	52.5

Tabla 4.8 Comparación de los porcentajes de pérdida de paquetes en el escenario 2



CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, las recomendaciones y los trabajos futuros resultado de la realización de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en su desarrollo, tal como se ha registrado en este documento. Las propuestas para trabajos futuros se desprenden de la necesidad de completar esta línea de estudio o bien proponer nuevas líneas de investigación relacionadas que contribuyan al estudio de las redes vehiculares.

5.1 CONCLUSIONES

5.1.1 Con respecto al desempeño de la red y los parámetros de QoS

- ✓ El incremento de vehículos dentro de la red causa una degradación en el *throughput* y un aumento de la pérdida de paquetes en ambos escenarios. Por otra parte el modelo VANET SA/PC mantiene mejores valores que el modelo VANET durante todo el proceso de simulación.
- ✓ Con respecto a la latencia, para ambos modelos se cumplen los parámetros de QoS en los escenarios simulados, pues nunca superan el valor máximo de latencia permitida, tampoco se ve afectada significativamente por el aumento de vehículos en la red.
- ✓ El modelo VANET SA/PC posee menores valores de latencia con respecto al modelo VANET, lo que permite concluir que los algoritmos de SA y PC no introducen tiempos de retardo significativos, lo cual radica en un beneficio para la red.
- ✓ Se concluye que el modelo VANET SA/PC permite con una misma cantidad de vehículos, mejores desempeños y parámetros de QoS en una red VANET.

5.1.2 Con respecto a los algoritmos de SA y PC

- ✓ El aplicar procedimientos de SA y PC reduce las colisiones, los efectos de la interferencia y la saturación de los canales, lo cual se refleja en una disminución en los porcentajes de pérdida de paquetes y en un aumento en los valores de *throughput* de la red.



- ✓ El esquema cooperativo que utiliza NACSA para realizar la respectiva SA, es beneficiosa para la red y fácil de implementar, pues son los nodos los que se encargan de comunicar y regular las condiciones de los respectivos SCH.
- ✓ Al llegar a 200 vehículos, el modelo VANET SA/PC alcanza su máximo desempeño, pues no es posible aumentar el número de transmisiones simultáneas como tampoco reducir de manera significativa la pérdida de paquetes.

5.1.3 Con respecto a la capacidad de la red.

- ✓ En ambos escenarios el modelo VANET SA/PC permite un mayor número de transmisiones simultáneas que el modelo VANET, lo que infiere en un aumento de la capacidad ya que la red puede atender un mayor número de usuarios simultáneamente con mejoras para el primer escenario hasta de un 42.85% y para el segundo escenario de un 14.18%.
- ✓ Los procedimientos de SA y PC permiten un mayor reuso espacial, un mejor aprovechamiento de la disponibilidad de los canales y una menor pérdida de paquetes, lo cual se refleja en el aumento de *throughput* de la red, lo que permite atender mayor número de nodos con mejores valores de desempeño en la red.
- ✓ Finalmente se concluye que el implementar procedimientos de SA y PC aumenta la capacidad ya que permite tener un mayor número de vehículos en una red VANET, con una menor degradación del desempeño y cumpliendo con los parámetros de QoS de los servicios ofrecidos.

5.2 RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo de grado presentó retos adicionales en términos de manejo de información, programación de líneas de código entre otros. Es por esto que se hace necesario establecer las siguientes recomendaciones para futuros trabajos.

- Para obtener resultados más contundentes, es necesario definir el modelo de propagación más adecuado para realizar los experimentos, que permita emular las condiciones del medio dependiendo del escenario en que se trabaje, pues no es lo mismo un entorno libre de obstáculos y estático, que un entorno urbano y de alta movilidad.
- En los archivos de simulación de las rutas de los vehículos, es mejor realizar una configuración manual y establecer flujos de vehículos básicos, pues esto permite cambiar la cantidad de vehículos de manera simple sin tener que crear otros archivos de simulación, algo que no lo permite la configuración automática de las rutas de los vehículos.



- Antes de pasar a la fase concreta de experimentación y obtención de los resultados, es necesario realizar pruebas preliminares con pocos vehículos y con bajos tiempos de simulación, con el propósito de revisar fallos, encontrar incongruencias y realizar los ajustes a tiempo pues una sola simulación de tiempo completo puede llevar más de 24 horas.
- Utilizar equipos con alta capacidad de procesamiento pues esto permite que los tiempos de simulación se reduzcan y se obtengan los resultados rápidamente.
- Se recomienda utilizar OMNET++ en máquinas con sistema operativo Linux ya que se reducen los tiempos de simulación además de que presenta la ventaja de que al presentarse un bloqueo del programa, este permite arrojar rápidamente el tipo de error que está entorpeciendo la simulación.
- Se recomienda realizar un estudio previo del código de VEINS o de cualquier otra herramienta de simulación pues esto permite encontrar el lugar indicado para introducir mejoras al código y nuevas modificaciones que complementen el estudio.

5.3 ESTUDIOS Y TRABAJOS FUTUROS

A partir de lo aprendido en este proyecto de grado, se proponen los siguientes trabajos:

- Análisis de la capacidad de una red VANET, donde se implemente el multisalto y protocolos de enrutamiento diseñados para Ad-Hoc y VANET.
- Estudio de la capacidad de la red VANET donde se incluya los dominios de infraestructura y se combinen las comunicaciones V2V y V2I, que además incluyan el uso de las capas IP y las capas de transporte TCP Y UDP. Para este estudio se propone también la implementación de los servicios de internet y de entretenimiento.
- Análisis de la capacidad de las redes VANET con implementación de procedimientos de SA y PC, donde se utilice un modelo de propagación más realista en el cual se incluya el efecto de los edificios, que tome en cuenta un modelo de movilidad basado en los entornos y comportamiento de los conductores aquí en Colombia, y en particular de la ciudad de Popayán.
- Se propone la continuación y mejoramiento de los algoritmos NACSA y MCA implementados en este trabajo de grado, en donde se estudie el caso cuando la red utilice multisalto para llegar a otros destinos. También se propone mejorar los mecanismos para el acceso al medio en el CCH, así como un esquema mejorado de control de potencia para los mensajes de control de la red.
- Analizar mediante un estudio matemático el algoritmo NACSA en una red VANET para evaluar teóricamente el efecto que tiene sobre la capacidad a nivel de sistema con respecto a un modelo teórico ideal donde no se implementa procedimientos de SA.



REFERENCIAS

- [1] Y. Toor, P. Mühlethaler, and A. Laouiti, "Vehicle Ad Hoc Networks: Applications and Related Technical Issues", *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, Vol. 10, No. 3, pp. 74-84, 2008.
- [2] V. E. Maldonado, "Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares usando mapas reales", Universidad Católica de Loja, Octubre de 2012.
- [3] H. López, "Estudio de la eficiencia de encaminamiento en redes Ad Hoc móviles con el protocolo AODV", proyecto fin de máster, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España, 2011.
- [4] Car to Car Communication Consortium, "C2C-CC Manifiesto: Overview of the C2C-CC System", *Car To Car Communication Consortium*, Version 1.1, August 2007. [Online]. Available: <http://www.car-to-car.org>. [Accessed: Sept. 20, 2013].
- [5] M. A. Torres, "Estudio y simulación de redes Ad-hoc vehiculares VANET's", Tesis, Universidad Católica de Pereira, Pereira, Colombia, 2013.
- [6] J. C Pallares, "Redes Ad-Hoc entre vehículos", Trabajo final de Carrera, Universidad Politécnica de Catalunya, Cataluña, España, 2008.
- [7] M. A. Rodríguez, "Evaluación de Propuestas de Servicios de Localización para redes VANET", Tesis, Universidad de Murcia, Murcia, España, 2009.
- [8] A. G. Caicedo, J. M. Martínez y G. Agredo, "Evaluación del Desempeño de Redes 802.11p/WAVE en la Transmisión de Datos, Voz y Video IP", Tesis, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2011
- [9] H. Chong, et al., "Analytical Study of the IEEE 802.11p MAC," In *Intelligent Transportation System*, vol. 13, no. 2, pp. 873-886, 2012.
- [10] S. Gräfling, P. Mähönen and J. Riihijärvi, "Performance Evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for Vehicular Communications," In *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2010 Second International Conference IEEE*, 2010, pp. 344-348.
- [11] D. Eckhoff, C. Sommer and F. Dressler, "On the Necessity of Accurate IEEE 802.11p Models for IVC Protocol Simulation," In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE*, pp. 1-5.
- [12] "IEEE 1609.4-2006 WAVE Multi-Channel Operation", 2006.



- [13] "IEEE 1609.3-2006 WAVE Networking Services", 2010.
- [14] D. Muñoz, Ed., et al., *Sistemas inalámbricos de Comunicación Personal*, México D.F, Alfaomega Grupo Editor, 2001, pp. 47-68.
- [15] W. Grote, C. Ávila y A. Molina. "Análisis de máximo desempeño para un WLAN operando a tasas fijas o adaptativas usando el estándar IEEE802.11a/b/g", *Ingeniare Revista Chilena de ingeniería*, Vol.15, No.3, pp. 320-327, 2007.
- [16] J. Sánchez, M. Meza, "Redes Celulares de tercera generación: CDMA 2000 y WCDMA", *Revista digital Científica y Tecnológica e-Gnosis*, Vol. 3, Art. 4, Abril de 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000304>. [Accesed: Sept. 30, 2013]
- [17] D.U. Campos-Delgado, F.J. Martinez-Lopez, and J.M. Luna-Rivera, "Quality-of-service analysis for linear multiuser detectors in the uplink of a wireless network", *Proc. 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2007)*, Vigo, Spain, June 2007.
- [18] C. J. Martínez, "Asignación de recursos multi-capa en redes inalámbricas móviles", Tesis, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, San Luís Potosí, México, 2011.
- [19] S. Agarwal; R.H. Katz; S.V. Krishnamurthy; S.K. Dao, "Distributed power control in Ad-Hoc wireless networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001 12th IEEE International Symposium on*, Vol.2, no., pp.F-59, F-66 Vol.2, September/October 2001.
- [20] H. Doumenec, "Estudios comparativo de protocolos de encaminamiento en redes VANET", Tesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2008.
- [21] "IEEE Std. 802.11p-2010, Wireless Access in Vehicular Environments", 2010.
- [22] M. M. Abbas and H. Mahmood, "Power Control in Ad Hoc Networks", in *Mobile Ad-Hoc Networks: Applications*, Prof. Xin Wang Ed. ISBN: 978-953-307-416-0, Published January 30, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0 license, Available: <http://www.intechopen.com/books/mobile-ad-hoc-networks-applications/power-control-in-ad-hoc-networks> [Accessed: March 2, 2013].
- [23] v. Kawadia and P. R. Kumar, (2003, March). "Power control and clustering in ad hoc networks", In *INFOCOM 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, IEEE Societies*, Vol. 1, pp. 459-469, March 2003.
- [24] H. C. Luo, E. H-K. Wu and G. H. Chen, "From spatial reuse to transmission power control for CSMA/CA based wireless ad hoc networks", In *Proceedings of 40th International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW)*, 2011, pp. 75-80.



[25] R. Ramanathan, and R. Rosales-Hain. "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment", In *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Proceedings of the IEEE INFOCOM*, Vol. 2, 2000.

[26] C. Campolo, A. Cortese and A. Molinaro, "CRaSCH: a cooperative scheme for service channel reservation in 802.11 p/WAVE vehicular ad hoc networks", In *International Conference on Ultra-Modern Telecommunications & Workshops ICUMT'09*, pp. 1-8, 2009.

[27] M. Di Felice, K. R. Chowdhury and L. Bononi, "Cooperative spectrum management in cognitive vehicular ad hoc networks", In *Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp. 47-54, 2011.

[28] A. T. Giang, A. Busson, D. Gruyer and A. Lambert, "A packing model to estimate VANET capacity", In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, pp. 1119–1124, 2012.

[29] O. M. Ulgen, et al., "Simulation Methodology- A Practitioner's Perspective", In *International Journal of Industrial Engineering, Applications and Practice*, vol. 1, no 2, 1994.

[30] M. Báguena, et al., "Simulación de redes vehiculares: retos hacia un modelo más realista".

[31] J. A Martínez Cano, "Estudio teórico experimental de un sistema distribuido MIMO en la banda de frecuencias de WIFI", Tesis, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Murcia, España, 2008.

[32] P. Gonzales, "Estudio del simulador de redes vehiculares VEINS", Tesis, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2012.

[33] *OMNeT++: Discrete Network Simulation Framework*, OMNeT Community, 2014. Available: <http://www.omnetpp.org>. [Accessed Feb. 4, 2014]

[34] P. van Wijngaarden, "Frame Capture in IEEE 802.11p Vehicular Networks: A Simulation-Based Approach", M. S. Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands, 2011.

[35] R. Meireles, et al., "Experimental study on the impact of obstructions in vehicular ad hoc networks".

[36] A. J. Campuzano, et al., "Caracterización experimental en banda estrecha del canal radio Vehicular-to-Vehicular (V2V) a 5.9 GHz", en *XXVII Edición del Simposio URSI*, Elche, España, 12-14 de septiembre de 2012.

[37] *OMNeT++: User Manual Version 4.3*, 2014



[38] Y. Qian, K. Lu and N. Moayeri, "A Secure VANET MAC Protocol for DSRC Applications", In *Global Telecommunications Conference, 2008, IEEE GLOBECOM 2008, IEEE*, 2008, pp.1-5.

[39] Y. Qian and N. Moayeri, "Design of Secure and Application-Oriented VANETs", In *Vehicular Technology Conference, 2008, VTC Spring 2008, IEEE*, 2008, pp.2794-2799.

[40] A. G. Ibáñez, et al., "A performance study of the 802.11p standard for vehicular applications", In *Intelligent Environments (IE), 2011 7th International Conference on*, IEEE, 2011, p. 165-170.

[41] D. F. Chavarro y O. C. Orozco, "Impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular", Tesis, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.