



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



DISEÑO DE UNA CIUDAD INTELIGENTE PARA REDES VEHICULARES: SISTEMA ESTADÍSTICO DE TRÁFICO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR: **Miguel Ángel Mateos Márquez**

TUTOR: **Mónica Aguilar Igartua**

PROFESOR GUÍA: **María Cristi Stefanelli**

FECHA: **Caracas, Julio de 2012**



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



DISEÑO DE UNA CIUDAD INTELIGENTE PARA REDES VEHICULARES: SISTEMA ESTADÍSTICO DE TRÁFICO

REALIZADO POR:

Miguel Ángel Mateos Márquez

TUTOR:

Mónica Aguilar Igartua

PROFESOR GUÍA:

María Cristi Stefanelli

FECHA:

Caracas, Julio de 2012



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



DISEÑO DE UNA CIUDAD INTELIGENTE PARA REDES VEHICULARES: SISTEMA ESTADÍSTICO DE TRÁFICO

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: _____

JURADO EXAMINADOR

Firma: _____ Firma: _____ Firma: _____
Nombre: _____ Nombre: _____ Nombre: _____

REALIZADO POR: **Miguel Ángel Mateos Márquez**
TUTOR: **Mónica Aguilar Igartua**
PROFESOR GUÍA: **María Cristi Stefanelli**
FECHA: **Caracas, Julio de 2012**

DISEÑO DE UNA CIUDAD INTELIGENTE PARA REDES VEHICULARES: SISTEMA ESTADÍSTICO DE TRÁFICO

Mateos Márquez, Miguel Ángel
miguel.4.mateos@gmail.com

Resumen

La seguridad en la carretera se ha convertido en un problema principal para gobiernos y fabricantes de automóviles en los últimos años. El desarrollo de nuevas tecnologías vehiculares ha permitido a compañías, investigadores e instituciones a centrar sus esfuerzos para la mejora de la seguridad vial. Durante las últimas décadas, la evolución de la tecnología de comunicación inalámbrica ha permitido a investigadores, el diseño de sistemas de comunicación en los cuales los vehículos forman parte de la red de comunicación. De esta forma, se creó el concepto de Sistema de Transporte Inteligente (STI), concepto utilizado al hablar sobre las tecnologías de comunicación entre vehículos e infraestructura, que mejoran la seguridad vial en el transporte, su mejor gestión, eficiencia medioambiental, entre otros.

Debido al alto coste económico de probar STI en situaciones reales, el uso de simuladores es realmente útil a la hora de desarrollar este tipo de sistemas. Así, en este proyecto el simulador de redes NCTUns ha sido modificado con el objetivo de añadirle nuevas posibilidades que ayuden al diseño de STI. Además, un escenario de una ciudad inteligente ha sido simulado con el objetivo de evaluar cómo el uso de estas redes permite la recolección y cálculo de estadísticas en tiempo real, además de comprobar cómo funcionan los cambios introducidos al código del simulador.

Palabras Clave: Redes vehiculares, ciudades inteligentes, redes híbridas, estadísticas de tráfico.

Índice General

Índice General	iii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xi
Introducción	xiii
Capítulo I	1
Planteamiento del Proyecto.....	1
I.1. Planteamiento del Proyecto	1
I.2. Objetivos de la Investigación.....	5
I.2.1. Objetivo General.....	5
I.2.2. Objetivos Específicos	5
I.3. Limitaciones y Alcances.....	6
I.4. Justificación	7
Capítulo II.....	9
Marco Referencial.....	9
II.1. Antecedentes	9
II.1.1. La Iniciativa del Coche Inteligente.....	11
II.1.2. Proyectos de Investigación y Desarrollo Relevantes.....	11
<i>INTERSAFE</i> :	14
II.1.3. Proyectos Europeos en Conjunto con Fabricantes de Vehículos.....	18
II.2. Bases Teóricas.....	20
II.2.1. MANETs (<i>Mobile Ad-Hoc Networks</i>).....	21
II.2.2. WSN (<i>Wireless Sensor Networks</i>).....	27
II.2.3. VANET (<i>Vehicular Ad-Hoc Network</i>).....	31
II.2.4. HSVN (<i>Hybrid Sensor Vehicular Network</i>)	37
Capítulo III.....	39
Marco Metodológico.....	39

III.1. Fase I: Investigación Inicial	40
III.2. Fase II: Diseño Teórico de la Ciudad Inteligente	41
III.3. Fase III: Modificación y Configuración del Simulador de Redes	42
III.4. Fase IV: Prueba de Funcionamiento	42
Capítulo IV	43
Desarrollo	43
IV.1. Fase I: Investigación Inicial	43
IV.1.1. Estudio de la Ingeniería Conceptual	44
IV.1.2. Instalación Máquina Virtual	44
IV.1.3. Instalación simulador de redes NCTUns	48
IV.2. Fase II: Diseño Teórico de la Ciudad Inteligente	51
IV.2.1. Marco de la Ciudad Inteligente	52
IV.2.2. Diseño de la Ciudad Inteligente	52
IV.2.3. Diseño del Sistema de Recolección y Procesado Estadístico de Tráfico	58
IV.3. Fase III: Modificación y Configuración NCTUns	66
IV.3.1 Capacidades Añadidas a NCTUns	67
IV.3.2. Escenario y Ambiente de Simulación	72
IV.4. Fase IV: Prueba de Funcionamiento	77
Capítulo V	79
Resultados	79
V.1. Resultados ITL ₅₉ (Entrada Ciudad Inteligente)	79
V.1.1. ITL ₅₉ Resultados Densidad de Tráfico	80
V.1.2. ITL ₅₉ Resultados Retardo de Tráfico	82
V.2. Resultados ITL ₄₄ (Centro de la Ciudad)	85
V.2.1. ITL ₄₄ Resultados Densidad de Tráfico	85
V.2.2. ITL ₄₄ Resultados Retardo de Tráfico	88
V.3. Resultados ITL ₂₉ (Afueras de la Ciudad)	90
V.3.1. ITL ₂₉ Resultados Densidad de Tráfico	90
V.3.2. ITL ₂₉ Resultados Retardo de Tráfico	93
Capítulo VI	96

Conclusiones y Recomendaciones	96
Bibliografía	100
Apéndices.....	A
Apéndice A: Glosario de Acrónimos	A
Apéndice B: Artículo Propuesto para Simposio de Vehículos Inteligentes de la IEEE (IV'12).....	D

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa Mental del Marco Teórico.....	9
Figura 2. Esquema de las fases de elaboración del Trabajo Especial de Grado.....	39
Figura 3. Arquitectura NCTUns.....	48
Figura 4. Diseño de la Ciudad Inteligente.....	53
Figura 5. Configuración Interfaces Ciudad Inteligente.....	54
Figura 6. Implementación Semáforos Inteligentes en la Ciudad.....	55
Figura 7. Implementación Semáforos Inteligentes en la Ciudad.....	56
Figura 8. Implementación Semáforos Inteligentes en la Ciudad.....	57
Figura 9. Ejemplo Recolección Estadística Densidad de Tráfico.....	59
Figura 10. Idea Original Recolección Estadística Retardo de Tráfico.....	60
Figura 11. Idea Implementada Recolección Estadística Retardo de Tráfico.....	61
Figura 12. Representación Escenario Simulado.....	75
Figura 13. Escenario Real Simulado.....	76
Figura 14. Resultados Densidad de Tráfico ITL_{59} IC 90%.....	80
Figura 15. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{59}	82
Figura 16. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{59}	83
Figura 17. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{59} IC 90%.....	85
Figura 18. Resultados Densidad de Tráfico ITL_{44} IC 90%.....	86
Figura 19. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{44}	88
Figura 20. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{44}	89
Figura 21. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{44} IC 90%.....	89
Figura 22. Resultados Densidad de Tráfico ITL_{29} IC 90%.....	91
Figura 23. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{29}	93
Figura 24. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{29}	94
Figura 25. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{29} IC 90%.....	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Etapas de elaboración del Trabajo Especial de Grado.....	40
Tabla 2. Requerimientos Mínimos para NCTUns.	45
Tabla 3. Sesión Máquina Virtual.	47
Tabla 4. Estructura Mensaje <i>STAT_msg</i>	63
Tabla 5. Número Vehículos vs Tiempo Simulación.	74
Tabla 6. Configuración de Simulación.	77
Tabla 7. Promedio Densidad Tráfico ITL_{44}	87
Tabla 8. Promedio Densidad Tráfico ITL_{29}	92

Introducción

La seguridad vial se ha convertido en un problema principal para los gobiernos y fabricantes de automóviles en las últimas dos décadas. El desarrollo de nuevas tecnologías ha hecho posible que compañías e instituciones centren sus esfuerzos en la mejora y desarrollo de la seguridad vial. Nuevos conceptos, tales como “Ciudades Inteligentes” y “Living Labs”, han aparecido en los últimos años y han mantenido una estrecha relación con los conceptos de comunicaciones vehículo a vehículo y comunicaciones vehículo a infraestructura, para el envío de información referente a las condiciones de las carreteras con las que el conductor debe lidiar diariamente, permitiendo que tome decisiones más adecuadas dependiendo la situación en que se encuentre.

Además el concepto de Ciudades Inteligentes considera que este tipo de ciudades desarrollará un sistema de Control de Tráfico Inteligente (CTI), así como infraestructura de tipo CTI localizable desde cualquier punto de la ciudad. Para la prueba de las posibilidades de estas ciudades futuras se han creado diversos laboratorios denominados Living Labs a lo largo del continente Europeo. Estos laboratorios son ciudades en donde los nuevos sistemas y tecnologías propuestas pueden ser probados y evaluados en condiciones reales.

En años recientes, los continuos avances en cuanto al desarrollo en comunicaciones inalámbricas han abierto numerosas líneas de investigación. Es en esta situación en el que el concepto de redes móviles nació. La movilidad constante de los individuos, así como la necesidad de estar siempre conectado requiere centrar esfuerzos de investigación en este campo en específico. Lógicamente, la conectividad y la transmisión de información entre nodos móviles es uno de los objetivos principales. Además, el crecimiento exponencial del número de vehículos dentro de las ciudades ha permitido que la seguridad vial y la eficiencia de transporte se conviertan en objetivos principales para la inversión de recursos (tiempo y dinero) en el proceso de investigación.

Durante las últimas décadas, la evolución de los sistemas de comunicación ha permitido a los fabricantes de automóviles mejorar las comunicaciones entre los vehículos y los diferentes agentes que participan en el proceso. Debido a esto, han sido creados nuevos tipos de redes para facilitar las comunicaciones entre vehículos, como lo son las Redes Vehiculares (VANETs), así como para facilitar las comunicaciones entre vehículos infraestructura, como lo son las Redes Híbridas de Sensores y Redes Vehiculares (HSVNs) que se utilizan en este proyecto.

Las VANETs son un caso particular dentro de las redes móviles de tipo Ad-Hoc, en las cuales los nodos son vehículos. El concepto de la tecnología vehicular utiliza los vehículos en movimiento como nodos de una red para la creación de redes móviles temporales. Inicialmente esto parece simple, sin embargo, presenta diversos retos tanto teóricos como técnicos (protocolos de enrutamiento, rangos de transmisión, frecuencia a utilizar, calidad de servicios, entre otros).

El estudio de Redes Vehiculares es sumamente costoso y complicado debido al alto costo de la implementación que sería necesaria para realizar pruebas en ambientes y condiciones reales. Debido a esto, existe la necesidad de realizar simulaciones lo más reales posibles para poder estudiar, desde un ordenador, la configuración y los resultados obtenidos para dichas redes en ambientes “reales”.

El presente Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo, desarrollar un sistema de recolección y procesado de estadísticas referentes al tráfico, en tiempo real, para futuras Ciudades Inteligentes, mediante el uso de un *software* de simulación de redes. Se plantearon cinco (5) objetivos específicos para establecer las prioridades y finalidades del proyecto, los cuales fueron manejados en cuatro (4) fases que estructuran de manera secuencial y lógica cada una de las actividades realizadas.

Con el objetivo de utilizar el *software* de simulación de redes que mejor se adaptara a las exigencias de este proyecto, se investigaron las diferentes tecnologías existentes para la simulación de redes. Recopilada la información necesaria y tomando en consideración los pros y contras de cada uno de ellos, se procedió a

realizar la selección e instalación del *software* de simulación de redes de código abierto elegido. Posteriormente se desarrolló, haciendo uso del lenguaje de programación C, una serie de mejoras al *software* de simulación con la finalidad de introducir cambios en el ambiente de simulación para hacerlo más realista. Implementados estos cambios, se realizó la comprobación del correcto funcionamiento de los nuevos módulos introducidos en el código del simulador, comparando su desempeño con los resultados teóricos esperados y la estructura diseñada para una Ciudad Inteligente.

Para poder llevar a cabo este Trabajo de Grado se realizaron seis (6) capítulos, estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I: Planteamiento del Proyecto. Contiene el planteamiento del problema que dio origen al proyecto de investigación, los objetivos establecidos a alcanzar durante su ejecución, los alcances y las posibles limitantes que tenga el proyecto y su respectiva justificación.

Capítulo II: Marco Teórico. En este capítulo se investigan los antecedentes del presente proyecto de investigación, así como las bases teóricas que respaldan este Trabajo Especial de Grado.

Capítulo III: Marco Metodológico. Se explica la metodología utilizada para llevar a cabo el proyecto, así como las actividades realizadas.

Capítulo IV: Desarrollo. Se explica de manera detallada cada una de las fases realizadas para el cumplimiento de cada objetivo específico que delimita el desarrollo del sistema de recolección y cálculo de estadísticas referentes al tráfico.

Capítulo V: Resultados. Contempla los resultados obtenidos a lo largo del proyecto con las pruebas realizadas que certifican la validez de los objetivos cumplidos.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones. Muestra las conclusiones que se logran obtener una vez finalizado el proyecto, con sus respectivas recomendaciones.

Capítulo I

Planteamiento del Proyecto

Cervo y Bervian, (1989) definen que toda investigación es “una actividad encaminada a la solución de problemas. Su objetivo consiste en hallar respuesta a preguntas mediante el empleo de procesos científicos...” (p.41)

Por otra parte, Mendoza (2007) sostiene que uno de los aspectos más difíciles al momento de abordar un proyecto de investigación es el planteamiento del problema, debido a la diversidad de problemas o situaciones que pueden presentarse a lo largo de la investigación.

En el presente capítulo se plantean los aspectos de la problemática que dio pie a la presente investigación, con sus respectivos argumentos y objetivos.

I.1. Planteamiento del Proyecto

Se entiende como congestión vehicular al flujo de vehículos que se ve saturado, ya sea debido al rápido crecimiento poblacional, a la deficiente construcción de infraestructura vial o al uso significativo de vehículos automotores, produciendo incrementos en los tiempos de viaje.

La congestión vehicular o “cola” como comúnmente se le conoce, se produce en las denominadas “horas pico”, que se deben a que en las grandes ciudades, la mayor parte de la masa laboral, se integra o retira de sus puestos de trabajo a una misma hora.

Según una encuesta realizada por IBM (*International Business Machines*) en su sección *Smarter Traffic* en el año 2011, 8.042 conductores de 20 ciudades

confirmaron que a lo largo de estos últimos años se ha ido intensificando la congestión vehicular alrededor del mundo, lo cual ha afectado lentamente la calidad de vida de los habitantes de las grandes ciudades (IBM, 2011). La pérdida de tiempo de los automovilistas y pasajeros, los retrasos, el desperdicio de combustible, el aumento de la contaminación en el aire y el desgaste de los vehículos son unas de las principales consecuencias de la congestión vehicular.

La congestión vehicular a nivel mundial está directamente relacionada con el parque automotor total en el Globo Terrestre. Según datos de OICA (*International Organization of Motor Vehicles Manufacturers*) la producción total de automóviles a nivel mundial para el año 2011 fue de 80,09 millones de vehículos, entre privados y comerciales, lo que representó un aumento en la manufactura de vehículos en un 3.2% con respecto al año 2010 (OICA). Además del aumento significativo en la producción de vehículos hay que tener en consideración la infraestructura dedicada a la circulación del parque automotor, la cual no crece al mismo ritmo que mantienen las empresas fabricantes de vehículos. Aunque en los países desarrollados la construcción de infraestructura automotriz es de un ritmo más acelerado que en países sub-desarrollados o en vías de desarrollo, no es capaz de mantener el ritmo al crecimiento del parque automotriz, por lo que, inevitablemente, con el paso del tiempo habrá mayor congestión vehicular y por ende más retraso en los traslados dentro de cualquier ciudad cosmopolita.

En Venezuela la congestión vehicular es parte del día a día, esto se observa principalmente en la capital del país, Caracas, donde el tráfico genera importantes costos para los ciudadanos, las empresas y el Estado. Existe una alta demanda en el uso de vehículos particulares, debido a muchos factores que se han venido dando a lo largo de los últimos años, entre ellos el incremento de la inseguridad, la ineficiencia del servicio de transporte público y el bajo costo de combustibles fósiles, lo que conlleva a que buena parte de la población opte por tomar un vehículo para efectuar viajes cortos que bien podrían efectuarse a pie. (Instituto Metropolitano de Urbanismo, 2010)

Parte del problema del congestionamiento en Caracas, también se debe a que esta ciudad no cuenta con la infraestructura adecuada en relación al crecimiento actual de cada día. Según la Sociedad Venezolana de Ingeniería Civil, el Área Metropolitana de Caracas tiene una estructura vial con capacidad de atender sólo el 30% del parque automotor actual. Una ciudad organizada debiera tener por lo menos 20% de sus áreas públicas dedicadas a vialidad, pero en Caracas este porcentaje es de apenas un 12% (Instituto Metropolitano de Urbanismo, 2010). Es por esto que muchos especialistas, entre ellos la profesora del posgrado de Transporte de la Universidad Simón Bolívar, Rosa Virginia Ocaña, coinciden en que a Caracas le hacen falta unos 300 kilómetros de vía para poder solucionar el problema del congestionamiento. (Itriago, 2008)

Como se mencionó anteriormente el gasto de combustible y el aumento de la contaminación ambiental debido a la liberación de CO₂ son consecuencias directas de la congestión vehicular. Según datos de OICA, el porcentaje de los niveles de CO₂ creados por el hombre y liberados a la atmósfera, asociados al transporte vehicular, es de 15.9% con respecto a la cantidad total liberada (OICA). De esta forma se puede asumir que a medida que el parque automotor aumente, también aumentará la congestión vehicular, ocasionando un mayor consumo de combustible y por ende mayor liberación de CO₂ al ambiente. Según datos de un informe de OICA, el gobierno de Japón estima reducir 28.3 millones de toneladas de dióxido de carbono con una mejor gestión del tráfico. (OICA)

Basándose en todos los factores mencionados anteriormente y con vistas a un futuro mejor para las siguientes generaciones, ha sido propuesto el desarrollo de ciudades sostenibles. Las ciudades sostenibles son aquellas que satisfacen las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras, basándose en dos componentes: el primero de ellos sería la sustentabilidad ecológica, mientras que el segundo sería la satisfacción de las necesidades básicas de la población (Díaz Malásquez, 2007). Dentro de las ciudades sostenibles se encuentran las ciudad inteligentes: ciudades comprometidas con su

entorno, con elementos arquitectónicos de vanguardia y donde las infraestructuras están dotadas de las soluciones tecnológicas más avanzadas para facilitar la interacción del ciudadano con los elementos urbanos, haciendo su vida más fácil. Existen innumerables iniciativas de ciudades inteligentes por todo el mundo, y diversas aproximaciones al mismo concepto. Se podrían clasificar estas iniciativas dentro de un número limitado de categorías según su enfoque principal: Eficiencia y Gestión Energética, Transporte y Movilidad Urbana, Medio Ambiente, Urbanismo, Turismo y Actividad Cultural, Sanidad y Atención Personal, entre otros. (Giffinger, 2007)

El grupo de investigación de este Trabajo Especial de Grado se ha propuesto el diseño y simulación de una Ciudad Inteligente basada en la ciudad de Barcelona, España, con la finalidad de crear un sistema de recolección y procesamiento de estadísticas referentes al tráfico vehicular. La iniciativa de esta *Smart City* a diseñar estará enfocada principalmente en el Transporte y Movilidad Urbana e implementará un sistema estadístico el cual servirá para la gestión del tráfico dentro de la ciudad, a partir del cálculo de estadísticas como densidad de vehículos en las vías, o el retardo de recorrido de la vía por parte de los vehículos.

Para el diseño y la simulación de la Ciudad Inteligente planteada se utilizará un *software* de simulación de redes de código abierto, el cual permita emular una ciudad basada en la zona de L'Eixample de Barcelona con un ambiente de simulación realista. En la ciudad inteligente se simularán situaciones de tráfico real, dentro de las cuales están consideradas “horas pico” de congestión vehicular, con la finalidad de comprobar si el sistema estadístico implementado se adecúa a los cambios de tráfico y retardo dentro de la ciudad.

I.2. Objetivos de la Investigación

Los objetivos del presente Trabajo Especial de Grado, se describen a continuación y se desglosan en un (1) objetivo general y cinco (5) objetivos específicos.

I.2.1. Objetivo General

Desarrollar y simular un sistema de recolección y procesado de estadísticas referentes al tráfico en tiempo real, mediante el uso de un *software* de simulación de redes de código abierto.

I.2.2. Objetivos Específicos

- Elegir un simulador de redes de código abierto que mejor se adapte a las características del Proyecto.
- Modificar el código fuente del simulador de redes para que el ambiente de simulación sea lo más real posible.
- Diseñar el marco de la Ciudad Inteligente basada en la ciudad de Barcelona.
- Implementar un Sistema Estadístico que recoja y procese en tiempo real estadísticas referentes a la densidad de vehículos y el retardo promedio.
- Comprobar el correcto funcionamiento de todos los cambios introducidos al código fuente del simulador además de la estabilidad del mismo.

I.3. Limitaciones y Alcances

El presente proyecto tiene como alcance el desarrollo y simulación de un sistema de recolección y procesado de estadísticas de tráfico vehicular en tiempo real, mediante el uso de simuladores de red código abierto.

El análisis teórico de los sistemas de recolección y procesado de estadísticas, así como el diseño del marco de la Ciudad Inteligente fueron llevados a cabo con la ayuda del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Este proyecto estuvo a cargo de la Profesora Mónica Aguilar Igartua y estuvo secundado por la estudiante de Doctorado Carolina Tripp.

El proyecto tiene como alcance o punto de mira, la implementación de futuras ciudades inteligentes a lo largo del mundo, para lograr el desarrollo de ciudades sostenibles. Aunque se vea como un alcance, también se podría observar como una limitación, ya que, a día de hoy, las ciudades inteligentes no son un hecho real, por lo que este tipo de estudios podrían ser aplazados o postergados por ser considerados para un futuro y no para el presente inmediato.

Este proyecto consiste en adaptar o modificar el código fuente del simulador de redes elegido para el Trabajo Especial de Grado. La limitación más importante que presenta consiste en el trabajo con código fuente desarrollado por Ingenieros y/o Programadores de diferentes partes del mundo, los cuales han realizado diferentes aportes al *software*, por lo que antes de realizar algún cambio, es de suma importancia entender en qué consisten las diferentes funciones y prototipos previamente declarados. Primero se debe entender la lógica de programación del simulador, para luego realizar el aporte o modificación deseada y que funcione correctamente.

I.4. Justificación

El congestionamiento vehicular se ha ido intensificando al pasar de los años de manera tal que representa una amenaza para la calidad de vida. Las “colas” causan un estrés adicional a la vida cotidiana de los ciudadanos, ocasionan una pérdida de tiempo innecesaria, y contribuyen a un mayor desgaste de los vehículos.

Celia Herrera, presidenta de SOTRAVIAL afirmó que este fenómeno, adaptado ya a la rutina capitalina, no debe ser considerado como “normal”, porque la movilidad vial debe ser atendida como un elemento primordial en todas las metrópolis en el ámbito mundial, “Caracas requiere de medidas urgentes”. El problema no se debe limitar a tomar exclusivamente medidas de tránsito o de construcción de nuevas vías. Se requiere también aplicar tecnologías inteligentes de Manejo Integral del Tráfico, que permitan centralizar la información en un Centro de Control, desde el cual se operen las intersecciones viales, semáforos y el transporte colectivo.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende estudiar la efectividad de los sistemas de recolección y procesado de estadísticas de tráfico, para la gestión del tráfico vehicular dentro de las futuras ciudades inteligentes.

El grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universidad Politécnica de Catalunya, brinda su apoyo para desarrollar un sistema que realice la recolección y el cálculo de estadísticas de tráfico, como lo son la densidad de vehículos y el retardo promedio de los mismos, para una simulación de una ciudad inteligente basada en la ciudad de Barcelona, España.

Con el procesamiento de los datos provenientes del sistema desarrollado, se puede realizar la gestión del tráfico en tiempo real tomando en consideración las estadísticas recolectadas. Con dicha gestión se optimizarían los recorridos de los vehículos dentro de la ciudad en cuanto a consumo energético, emisiones de CO₂ y tiempo de trayecto, posibilitando a la ciudad inteligente ser sostenible.

Además, en un futuro se podrían añadir diversas estadísticas de tráfico al sistema, como podría ser el número de pasajeros dentro del vehículo, además de añadir servicios a la estructura implementada para el funcionamiento del sistema, como podrían ser el pago de peajes de manera inalámbrica o la localización de puestos para estacionar el vehículo dentro de un área determinada de la ciudad.

Capítulo II

Marco Referencial

En toda investigación surgen diferentes interrogantes, para responderlas se realiza un estudio de todos los conceptos relacionados con los objetivos del proyecto. El mapa mental que se observa a continuación contiene todos los puntos tratados en este capítulo, con una breve descripción de su uso, ayudarán a entender el desarrollo del sistema de recolección y cómputo de estadísticas de tráfico.

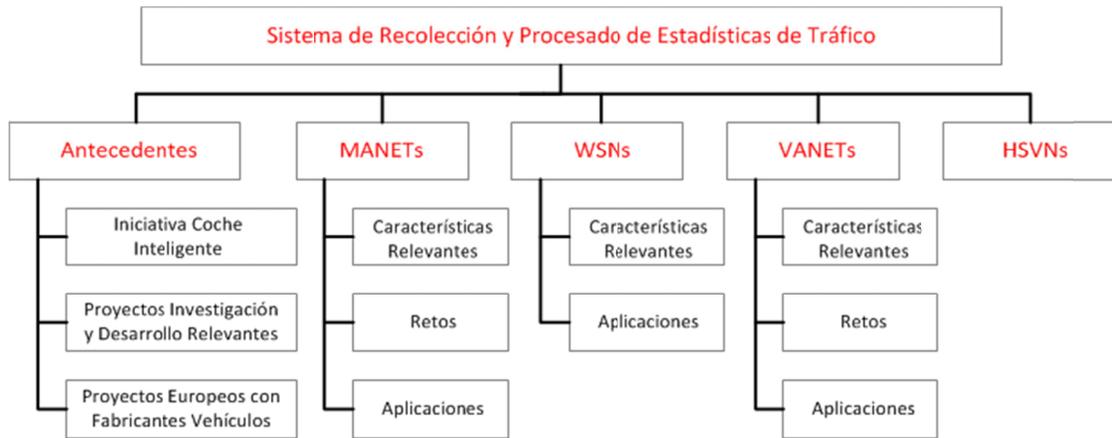


Figura 1. Mapa Mental del Marco Teórico.

Fuente: Autoría Propia.

II.1. Antecedentes

En este apartado se revisará el Estado del Arte de diversos proyectos sobre redes vehiculares. El enfoque específico trata sobre proyectos y consorcios europeos promovidos en tiempos recientes.

Desde 1980 la Unión Europea (EU) ha realizado numerosos esfuerzos para la mejora de la seguridad vial, fundando diversos proyectos con este objetivo. Algunos de estos proyectos han sido enfocados para redes vehiculares (VANETs) y redes híbridas (HSVNs), obteniendo numerosos logros desde sus comienzos.

El primer predecesor de VANETs o HSVNs es el proyecto denominado PROMETHEUS (*PROgramme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety*, 1987-1995) apoyado por EUREKA (*European Research Coordination Agency*) y llevado a cabo por la Universidad Bundeswehr de Múnich y la compañía automotriz Daimler-Benz. Este proyecto de investigación fue la primera aproximación para el desarrollo de automóviles autónomos (vehículos sin necesidad de ser manejados por un conductor), equipando a los vehículos con sistemas de auto pilotaje, capaces de conducir el coche desde un punto a otro sin necesidad de interacción humana. El proyecto evolucionó a través de los años cambiando su enfoque final con el objetivo de dotar al conductor de información, mediante la utilización de sistemas internos en el vehículo como lo podría ser un asistente de navegación inteligente (Olariu, 2009).

Otro proyecto que podría ser considerado como el comienzo para las redes coche a coche sería el proyecto DRIVE I (*Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe*, 1988-1991) el cual proponía el *Advanced Transport Telematics* (ATT). El objetivo de DRIVE I era la conectividad de coches con infraestructura adyacente a vías o carreteras y tuvo una continuación en forma de otro proyecto denominado DRIVE II (1992-1994) (Olariu, 2009).

Estos proyectos supusieron el primer esfuerzo por parte de la sociedad europea para el desarrollo de comunicaciones entre coches y entre coches e infraestructura (*CAR-2-X Communications*), pero la falta de tecnología apropiada no permitió que estos grupos de investigación encontraran ninguna solución efectiva. El desarrollo de la tecnología inalámbrica ha permitido a organizaciones y compañías

europas centrar sus investigaciones en comunicaciones de tipo CAR-2-X, teniendo como objetivo primordial el aumento de la seguridad vial.

II.1.1. La Iniciativa del Coche Inteligente

La iniciativa de coche inteligente, por parte de la Unión Europea, promueve el uso de comunicaciones radio, desarrolladas en los últimos años, para mejorar la calidad de vida de los usuarios de los vehículos. El objetivo principal de esta iniciativa es el desarrollo de un vehículo inteligente para lograr vías más limpias y seguras. Estos vehículos inteligentes deberían asistir a los conductores en sus funciones de manejo, proveyendo información valiosa (estado de las vías, condiciones meteorológicas, condiciones de tráfico, etc.) en tiempo real y, en un futuro no muy lejano, ayudando en la elección de la ruta más óptima energéticamente.

Esta iniciativa promueve y coordina los esfuerzos globales de los actores principales que desarrollan los prototipos de estos futuros vehículos. Estos actores son fabricantes de vehículos, compañías de telecomunicación, servicios de transporte y reguladores europeos. La iniciativa basa la investigación en tecnología apropiada y realiza el trabajo de informar a los consumidores de la futura implantación de este tipo de vehículos en el mercado.

II.1.2. Proyectos de Investigación y Desarrollo Relevantes

La Comisión Europea ha desarrollado una política para una movilidad sostenida. Dicha política define un marco en el cual se asegura un alto nivel de movilidad, protección del ambiente y de los seres humanos, innovación tecnológica y cooperación internacional así como también se encontraba definida la ambiciosa meta de reducir los accidentes de tráfico en un 50% para el año 2010. Por ello la Unión

Europea ha fundado diferentes proyectos con esta idea, a través de sus diferentes *Framework Programs* (FP). (CORDIS)

Los resultados más importantes de estos programas de investigación han sido obtenidos por proyectos fundados dentro del Sexto y Séptimo *Framework Program* (6thFP & 7thFP). Algunos proyectos de los mencionados anteriormente serían: GST, PReVENT, FleetNet y NOW, dentro del Sexto FP y CIVIS, SAFESPOT y COOPERS dentro del Séptimo FP. (CORDIS)

FleetNet: Internet en la Vía (2000-2003)

Proyecto desarrollado por la compañía Daimler y fundado por el Ministerio de Educación e Investigación alemán, el cual estudiaba las posibilidades reales de establecer comunicaciones entre vehículos. El proyecto consistió en la investigación sobre diferentes tecnologías radio, la transmisión de datos sobre comunicaciones de radar, entre otros. Después de un período inicial de investigación, la tecnología radio seleccionada para el desarrollo de un prototipo de plataforma para gestionar comunicaciones entre vehículos fue el estándar de la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11. Debido al rango de comunicación limitado de esta tecnología, el estudio se enfocó en comunicaciones multi-salto, basándose en la posición de los nodos para reducir la dificultad en términos de escalabilidad. En este sistema cada nodo selecciona el siguiente salto para un paquete de datos reduciendo la distancia geográfica hacia el destino.

Las simulaciones de este proyecto concluyeron que un protocolo de enrutamiento basado en la posición de sus nodos mejoraba con respecto a protocolos de enrutamiento basados en topología, dentro de autopistas y en términos de la relación de paquetes enviados dentro de comunicaciones que requirieron multi-salto. Este proyecto desarrolló un protocolo de enrutamiento basado en el SO Linux, utilizando el estándar 802.11a y una antena planar. El enrutador utilizaba GPS

(*Global Positioning System*) a través de una conexión Ethernet por medio de la cual obtenía información relacionada al sistema de posicionamiento. Simulaciones en entornos reales, utilizando vehículos reales dentro de autopistas, finalizaron con resultados prometedores para el proyecto. (NEC Laboratory Europe, 2002)

NOW: *Network On Wheels* (2004-2008)

El sucesor de FleetNet nació a partir de los mismos implicados, y surgió con la idea de desarrollar una plataforma de comunicación abierta para la seguridad vial, eficiencia de tráfico, aplicaciones de *infotainment* (información y entretenimiento), así como también analizar estrategias para la introducción al mercado europeo de estas comunicaciones vehículo a vehículo, creando un estándar europeo.

Este proyecto trata conceptos de seguridad, eficiencia de tráfico y aplicaciones de *infotainment*, añadiendo gran dificultad al mismo, dado los diferentes tipos de requerimientos para cada uno de ellos. NOW distingue entre dos tipos de mensaje: el primer tipo de ellos encargado de proveer información periódica a los usuarios (*beacons* o *heartbeats*), mientras que el segundo tipo es el encargado de proveer información no periódica a los usuarios (accidentes de tráfico o situaciones inesperadas).

La arquitectura de red del proyecto utilizaba dos protocolos diferentes: un protocolo Ad-Hoc coche a coche que manejaba información referente a aplicaciones de seguridad vial y otro protocolo más tradicional basado en Internet (IP), para aplicaciones de *infotainment*. La arquitectura de red utilizaba una interfaz radio con el estándar 802.11p de la IEEE para las aplicaciones de seguridad y una interfaz radio con el estándar 802.11a/b/g para las aplicaciones de información y entretenimiento. Este proyecto creó un prototipo de sistema de comunicación basado en Linux a partir de una plataforma de comunicación de tipo CAR-2-X. (NOW)

PreVENT (2004-2008)

Proyecto de investigación fundado por la Comisión Europea para la mejora de la seguridad vial. Fue subdividido en trece (13) sub-proyectos diferentes, cada uno de ellos investigando diferentes campos referentes a la seguridad vial, abordando los problemas desde diferentes puntos de vista. De estos sub-proyectos sólo dos (2) incluían redes vehiculares: WILLWARN e INTERSAFE. (PreVENT)

WILLWARN:

Utiliza diferentes sensores para notificar al conductor de situaciones inesperadas dentro de las vías. Para el envío de mensajes WILLWARN utiliza la misma tecnología mencionada en el proyecto NOW. Los escenarios cubiertos por este proyecto se detallan a continuación:

- Detección y Aviso de obstáculos en la vía, avisando si el propio vehículo es un obstáculo para otros conductores.
- Aviso de vehículos en estado de emergencia y vehículos lentos.
- Detección de reducción del coeficiente de roce en las vías y de la reducción de la visibilidad del conductor, dependiendo del clima.
- Aviso de zonas peligrosas, como zonas de construcción.

INTERSAFE:

Por medio de la combinación de sensores y tecnologías de comunicación logra el aumento de la seguridad vial dentro de las intersecciones. Este proyecto desarrolló un sistema de alerta para el conductor dentro de intersecciones, que avisaba al conductor de situaciones de alto riesgo, basándose en la localización del vehículo, en la detección y predicción de movimiento de otros objetos dentro de la intersección, en comunicaciones con los semáforos y por último información de alto nivel del mapa de la zona.

CARLINK (2006-2008)

Proyecto desarrollado por la Universidad de Málaga y fundado por el gobierno español y la Comisión Europea, con el objetivo principal del desarrollo de una plataforma de servicio inalámbrica e inteligente para el tráfico, la cual lograra comunicaciones entre vehículos y dispositivos adyacentes a las vías los cuales estén dotados de esta tecnología, como podrían ser los semáforos.

El primer objetivo de este proyecto no fueron las comunicaciones coche a coche para lograr evitar situaciones inesperadas en las vías, sino más bien se buscaba informar acerca del clima local y la administración del tráfico del transporte urbano mediante comunicaciones inalámbricas entre vehículos y estaciones locales de base de datos. Para transmitir esta información, los vehículos podrían comunicarse entre ellos al ser miembros de una red Ad-Hoc.

El sistema de comunicaciones radio que fue probado en este proyecto fueron extensiones evolutivas de las redes de área local inalámbricas (WLAN), WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) o comunicaciones móviles como GPRS (*General Packet Radio Service*). Estos sistemas fueron probados en diferentes condiciones meteorológicas dentro de diferentes topologías de red. (CARLINK)

SEVECOM (2006-2008)

Proyecto de investigación de la Comisión Europea centrado en los aspectos de seguridad y privacidad dentro de los sistemas de comunicación de tipo CAR-2-X.

La diferencia entre este proyecto y los mencionados anteriormente, es el esfuerzo realizado en una arquitectura de seguridad para los sistemas de comunicación CAR-2-X. En un segundo plano, el proyecto desarrolló soluciones para la detección de intrusos dentro del vehículo, la detección de malfuncionamiento y por

último aportó soluciones en el tema de consistencia de datos y procesamiento seguro. (SEVECOM)

COMeSafety (2006-2009)

Nació como una plataforma de soporte para todas las partes de la Comisión Europea interesadas en la seguridad vial. Esta plataforma provee coordinación y consolida resultados a partir de proyectos de investigación y desarrollo de mayor escala, mencionados anteriormente. (COMeSafety)

SAFESPOT (2006-2010)

Proyecto fundado por la Comisión Europea en el cual se combinaban comunicaciones coche a coche y comunicaciones entre vehículos e infraestructura. Este proyecto desarrolla un asistente de seguridad que detecta situaciones de riesgo potenciales con anticipación, dotando al conductor de información acerca de la situación que lo rodea en espacio y tiempo.

El proyecto se basa principalmente en el estándar de la IEEE 802.11 y el punto de partida en su inicio fue el proyecto NOW. Algunos retos de este proyecto son la cooperación con el proyecto CVIS (*Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*) el cual buscaba el desarrollo de un estándar europeo a partir de la Organización Internacional de Estandarización (ISO) para las comunicaciones de tipo CAR-2-X, además del desarrollo de un sistema de posicionamiento relativo confiable para mejorar este tipo de comunicaciones.

Este proyecto ha desarrollado el concepto de Mapas Locales Dinámicos (LDM) con la idea de compartir información estática y dinámica. LDM es una representación multicapas del vehículo y de todo lo que lo rodea, recolectando

información gracias a sus sensores y dotando al conductor de información relativa a eventos inesperados para que reaccionen de forma segura. (SAFESPOT)

COOPERS (2006-2012)

Proyecto de investigación fundado por la Comisión Europea cuyo objetivo se centra en la gestión del tráfico a través de comunicaciones inalámbricas entre vehículos y a través de comunicaciones inalámbricas entre vehículos e infraestructura. El proyecto está dividido en tres (3) bloques principales: (COOPERS)

- 1) El primer bloque se centra en la mejora de la infraestructura de sensores en las vías.
- 2) El segundo bloque se centra en el desarrollo de infraestructura de comunicación para mejorar su confiabilidad, robustez y capacidad de trabajo en tiempo real. Los sistemas de comunicación utilizados con este propósito fueron DAB (*Digital Audio Broadcast*), GPRS, UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), WLAN y tecnologías basadas en microondas.
- 3) El tercer bloque aún no se lleva a cabo y analizará los resultados obtenidos en las principales autopistas europeas.

CVIS (2006-2012)

Proyecto de investigación fundado por la Comisión Europea cuyos objetivos principales son la mejora de la seguridad vial y el aumento de la eficiencia de tráfico, mediante cuatro (4) nuevos servicios otorgados a los usuarios. Estos sistemas son COMM (Permite comunicaciones de tipo CAR-2-X), POMA (Permite sistemas de posicionamiento), COMO (Permite sistemas de monitorización) y FOAM (Permite interconectar vehículos con infraestructura).

Este proyecto considera una amplia gama de tecnologías de comunicación como podrían ser tecnologías de comunicación celular (GPRS y UMTS), tecnologías basadas en infrarrojo y tecnologías inalámbricas. Los resultados finales de este proyecto aún no están disponibles. (CVIS)

II.1.3. Proyectos Europeos en Conjunto con Fabricantes de Vehículos

CAR-2-CAR Communication Consortium (C2C-C)

Consortio de los mayores fabricantes de automóviles europeos cuyo objetivo es la creación de un estándar europeo para las comunicaciones de tipo CAR-2-X. Este estándar estaría basado en tecnologías de comunicaciones inalámbricas, y aboga por la mejora de la seguridad vial y la eficiencia de tráfico.

Este consorcio está dividido en seis (6) grupos: WG PHY/MAC, centrado en la capa física y la de control de acceso al medio; WG NET, centrado en la capa de red y la de transporte; WG ARCH, define la arquitectura de los protocolos para comunicaciones de tipo CAR-2-X; WG APP, identifica los requerimientos para aplicaciones y protocolos; WG SEC, centrado en la seguridad de los protocolos; y por último WG STA, centrado en los temas de estandarización de las tecnologías.

Los principales fabricantes de vehículos que forman parte en este proyecto son: Audi, el Grupo BMW, Daimler, Fiat, Honda, Opel, Renault, Volkswagen y Volvo. (CAR2CAR)

EsafetyAware

Consortio que busca acelerar la introducción en el mercado de tecnologías que sean capaces de salvar vidas relacionadas con comunicaciones de tipo CAR-2-X,

por medio de la organización de campañas de información y eventos enfocados en la concientización de los beneficios de eSafety entre los encargados de aplicar las políticas de gestión de tráfico y los usuarios finales.

En este consorcio se encuentran fabricantes de vehículos, como lo son Hyundai-Kia Motors o Toyota, fabricantes de llantas, como lo son Bridgestone o Continental, y gobiernos o asociaciones, como lo son la Comisión Europea o la Federación Internacional de Automóviles (FIA).

Algunos de los sistemas desarrollados y promovidos por EsafetyAware son el sistema de monitorización de punto ciego, el sistema de alerta de velocidad o el sistema de adaptación de los faros de los vehículos. (ESAFETYAWARE)

Living Labs

Son ambientes de prueba y experimentación de la vida real en donde los usuarios y productores co-crean innovaciones tecnológicas. La Comisión Europea caracteriza estos laboratorios como sociedades público-privadas de personas para innovaciones impulsadas por los usuarios. En consecuencia, un *Living Lab* emplea cuatro (4) actividades principales:

- 1) Co-Creación: Diseño realizado entre usuarios y productores.
- 2) Exploración: Descubre usos emergentes, comportamientos y oportunidades de mercado de las tecnologías en desarrollo.
- 3) Experimentación: Implementa escenarios reales dentro de las comunidades de usuarios.
- 4) Evaluación: Evaluación de conceptos, productos y servicios de acuerdo a criterios socio económicos.

Con esta intención, numerosas ciudades europeas y alrededor del mundo están siendo utilizadas actualmente como *Living Labs*. (Open Living Labs)

II.2. Bases Teóricas

En los últimos años, el crecimiento considerable del sector de servicios móviles alrededor del mundo ha sido, ciertamente, el mayor fenómeno dentro del campo de las telecomunicaciones. La tecnología inalámbrica es capaz de alcanzar virtualmente cualquier localización sobre la superficie de la Tierra. Con tal éxito de demanda de comunicaciones móviles no es de extrañar que la tecnología inalámbrica haya dado lugar al desarrollo de nuevos servicios multimedia y de la evolución de los requerimientos de los usuarios en términos de rendimiento y movilidad a través de diversos sistemas. Las comunicaciones móviles ya son aplicadas en el ámbito de la computación personal y empresarial, haciendo que los hábitos de vida de las personas así como su forma de trabajo evolucionen. (Labiód, 2008)

Generalmente, hay dos enfoques diferentes para habilitar unidades móviles inalámbricas para que se comuniquen entre sí:

Redes Centralizadas

Las redes inalámbricas móviles se han basado, tradicionalmente, en el concepto de las comunicaciones celulares, en donde todos los dispositivos están conectados a un nodo central el cual es el agente principal para todas las comunicaciones de la red basadas en una buena infraestructura. Ejemplos típicos de este tipo de redes son: GSM, UMTS, WLAN, entre otros.

Redes sin Infraestructura

Este tipo de redes son comúnmente conocidas como redes móviles Ad-Hoc o MANETs. Estas redes son una colección de nodos inalámbricos que pueden ser configurados dinámicamente en cualquier lugar y en cualquier momento sin la necesidad de la utilización de ninguna infraestructura de red pre-existente. Es un sistema autónomo en donde los nodos móviles interconectados por enlaces inalámbricos son capaces de moverse aleatoriamente e inclusive actuar como enrutadores en un momento dado.

El diseño de protocolos de red para MANETs es un área de investigación extensa y compleja con numerosos retos. Debido a esto, durante los últimos años las redes móviles Ad-Hoc se han convertido en un campo de estudio muy popular dentro de las comunidades de investigación.

II.2.1. MANETs (*Mobile Ad-Hoc Networks*)

Colección de dispositivos inalámbricos que pueden formar una red de forma dinámica con un capacidad de despliegue muy simple, dando posibilidad a nuevas aplicaciones que no habían podido emerger hasta ahora y ofreciendo soluciones en múltiples escenarios en los que no se cuenta con ningún tipo de infraestructura. Estos dispositivos o nodos pueden movilizarse de forma aleatoria y son capaces de organizarse entre ellos de forma arbitraria, colaborando para lograr que las comunicaciones sean posibles. Ejemplos de este tipo de dispositivos son: laptops, PDAs, teléfonos celulares, entre otros.

II.2.1.1. Características Resaltantes

Topología de Red Dinámica

Sin duda el elemento característico de MANET. Como los nodos son móviles, la topología de red puede cambiar rápida e impredeciblemente haciendo que la conectividad entre los terminales varíe con el tiempo. Estas redes deben adaptarse al tráfico, a las condiciones de propagación del entorno así como también a los patrones de movimiento de los nodos que forman parte de la red.

Terminales Autónomos y Auto-Organización

En MANETs cada terminal móvil es un nodo autónomo, que podría funcionar tanto como usuario como enrutador y son responsables del reconocimiento dinámico de otros nodos para comunicarse o gestionar la configuración de la red.

Operaciones Distribuidas

Ya que no existe ninguna red de fondo para el control centralizado del funcionamiento de la red, el control y gestión de la red está distribuida entre todos los dispositivos que pertenecen a la red. Los nodos relacionados con una MANET deben colaborar entre sí y actuar como apoyo cuando sea necesario, para implementar las funciones de enrutamiento y seguridad.

Enrutamiento Multi Salto

En determinados casos el envío de paquetes desde una fuente a su destino final puede quedar fuera del alcance directo de transmisión inalámbrica, por lo que los paquetes deberán ser reenviados por uno o más nodos intermedios.

Capacidad de Enlace Fluctuante

La naturaleza de altas tasas de bit erróneos de las comunicaciones inalámbricas puede ser aún más crítica en MANETs. Las transmisiones radio son vulnerables al ruido, desvanecimientos, múltiple acceso y condiciones de interferencia, además de tener menor ancho de banda que las redes alámbricas.

Terminales Ligeros

En la mayoría de los casos, los nodos de redes MANET son dispositivos móviles con una capacidad de procesamiento limitada, memorias de tamaño reducida y poco almacenamiento energético. Estos dispositivos necesitan de algoritmos optimizados para ejecutar funciones de comunicación y cómputo.

Escalabilidad

En diversas ocasiones el número de dispositivos que conforman la red puede aumentar hasta decenas o centenas. Al no haber un dispositivo central encargado de la gestión de la red, añadir o rechazar nuevos nodos a la topología de red es un procedimiento sencillo.

II.2.1.2. Retos

Enrutamiento

El enrutamiento en redes Ad-Hoc, el cual es bastante diferente del enrutamiento tradicional basado en IP, es un problema particular y complejo debido a diferentes factores entre los cuales se encuentran la topología, la selección de *routers*, la localización del iniciador de la solicitud, la limitación de recursos y la baja fiabilidad en enlaces inalámbricos. Un nodo debe conocer al menos la información de accesibilidad a sus vecinos para determinadas rutas de paquetes, mientras que la topología de red puede cambiar muy a menudo. Por ello, las rutas pueden cambiar mientras estén en uso y dejar de ser válidas en cortos períodos de tiempo.

Desde la llegada de los conceptos de redes tipo Ad-Hoc, diferentes propuestas han sido estudiadas, simuladas y evaluadas. Las propuestas referidas al enrutamiento de este tipo de redes pueden clasificarse en dos categorías: enrutamiento reactivo y enrutamiento proactivo. Protocolos proactivos, o basados en tablas de enrutamiento, están inspirados directamente en protocolos implementados para Internet y consisten en mantener una tabla de enrutamiento para la recepción y envío de información a cualquier nodo de la red. Por el contrario, los protocolos reactivos, recolectan la información fundamental de una ruta entre dos nodos cuando se expresa una solicitud para esta ruta mediante las capas de alto nivel del protocolo. Este tipo de protocolo intenta mantener tan solo las rutas activas las cuales estén lo más actualizada posible

para minimizar el uso de mensajes de control y ahorrar ancho de banda. (Prakash, 2006)

Debilidad en Escalabilidad

El número de nodos dentro de la red puede ser considerablemente alto, por lo que encontrar la ruta hasta el destino requeriría un cambio frecuente de información de control de enrutamiento entre los nodos de la red. Por lo tanto, la cantidad de actualizaciones puede ser sustancial, siendo aún mayor cuando existen nodos con una gran movilidad dentro de la red.

Seguridad

Históricamente, la seguridad en redes ha adoptado un paradigma centralizado con una gran medida de protección para satisfacer los requisitos de seguridad. Esto ha sido efectivo porque los privilegios de cada uno de los nodos de la red son gestionados por máquinas dedicadas, por ejemplo servidores de autenticación. La pertenencia a este tipo de redes permite a los nodos operar de una forma abierta gracias a la simplicidad de garantía que cualquier usuario malicioso del mundo exterior será incapaz de acceder a la red. Aunque estas soluciones han sido consideradas desde muy temprano en la evolución de redes Ad-Hoc, los intentos de adaptación de soluciones cliente-servidor a un ambiente descentralizado han sido inefectivos.

Los intentos para dotar de seguridad a redes de tipo Ad-Hoc deben seguir siendo soluciones de tipo Ad-Hoc: se debe establecer la seguridad sin referencia a un nodo centralizado. En su lugar, los paradigmas de seguridad deben ser llevados a cabo por la cooperación de todos los nodos disponibles en la red.

Una implementación de un protocolo de autenticación ineficiente puede conllevar a un aumento en la vulnerabilidad y la red quede comprometida. Los ataques de nodos maliciosos pueden ir desde reproducción de mensajes, escucha pasiva con inyección de mensajes erróneos e información no confiable dentro de las

tablas de enrutamiento con el fin de la congestión de la red y la denegación de servicio mediante el envío de tráfico de paquetes a un agujero negro.

Calidad de Servicio (QoS)

Como en las redes alámbricas, los flujos generados por las aplicaciones soportados para redes Ad-Hoc tienen diversas características como el tipo y el volumen de información intercambiada, duración o interacción. Estos flujos también tienen diferentes requerimientos de calidad de servicio. Por ello el procesado uniforme de paquetes no es apropiado para este tipo de redes, y el soporte para calidad de servicio el cual considera los distintos niveles requeridos es fundamental.

En MANETs el ambiente de red dinámica con continuos cambios en la topología de red y la limitación de recursos plantea el problema de calidad de servicio en los diferentes niveles. (Prakash, 2006)

Operaciones con Energía Restringida

Algunos o todos los nodos de una red Ad-Hoc pueden depender su funcionamiento en baterías u otros medios agotables para obtener su energía. Por ello, las redes de conservación de energía se han vuelto sumamente populares dentro del marco de investigación de redes Ad-Hoc.

La eficiencia energética en la interfaz de red puede ser mejorada mediante el desarrollo de tecnologías de transmisión/recepción en la capa física, pero especialmente con algoritmos de red específicos. Sin embargo, la conservación de energía se está tratando actualmente en todas las capas de la pila de protocolo. (Prakash, 2006)

Interoperación

La capacidad de auto-organización dentro de las redes MANET se convierte en un reto cuando dos redes formadas independientemente se sitúan cercanas físicamente una de la otra. Este es un tema de investigación aun por explorar que

tiene implicaciones en todos los niveles en el diseño de este tipo de sistemas. El tema de la unión de dos redes no es trivial: las redes podrían utilizar sincronizaciones diferentes, diferentes MAC y diferentes protocolos de enrutamiento y seguridad.

Otro tema importante surge cuando se toman en cuenta todas las redes inalámbricas. Uno de los objetivos más importantes de la investigación reciente sobre redes inalámbricas es la de proporcionar una integración perfecta de todos los tipos de red inalámbrica. La cuestión plantea preguntas sobre cómo la red Ad-Hoc podría ser diseñada de manera que sea compatible con, por ejemplo, redes inalámbricas y redes celulares 3G y 4G. (Prakash, 2006)

II.2.1.3. Aplicaciones

Redes Comunales

Para algunos escenarios de negocio, la necesidad de informática en colaboración podría ser más importante fuera de ambientes de oficina que dentro de un edificio. Después de todo, este es el caso en el cual las personas necesitan tener reuniones fuera del ambiente de trabajo para cooperar e intercambiar información de ciertos proyectos. También es una solución interesante para escenarios de vecinos, estadios, museos y aeropuertos.

Aplicaciones para Gestión de Situaciones de Crisis

Estas situaciones incluyen emergencias u operaciones de rescate, como resultado de desastres naturales en donde la infraestructura de comunicaciones está dañada o inoperativa (tsunamis o huracanes); restaurar las comunicaciones rápidamente es esencial. Con el uso de redes Ad-Hoc, la infraestructura podría configurarse en horas en vez de días o semanas que una comunicación alámbrica requeriría.

Redes de Área Personal

Una red de área personal (*PAN*) es una red localizada de corto alcance en donde los nodos están usualmente asociados con una persona en específico. Bluetooth es un ejemplo de una tecnología diseñada para soportar PANs eliminando la necesidad de cables entre dispositivos como impresoras, teléfonos celulares, PDA o computadoras portátiles.

Aplicaciones Militares de Campo de Batalla

Las redes Ad-Hoc fueron creadas para propósitos militares. Este tipo de redes permitiría a los militares tomar ventaja de la tecnología de red de lugares comunes para mantener una red de información entre soldados, vehículos y la sede de información militar.

Además de estas aplicaciones, dos campos de estudio han llegado a ser muy interesantes dentro de la comunidad de investigadores: redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks*) y redes de vehículos Ad-Hoc (*Vehicular Ad-Hoc Networks*).

II.2.2. WSN (*Wireless Sensor Networks*)

En años recientes, los avances en las tecnologías inalámbricas, la fabricación e integración de micro-procesadores han permitido una nueva visión tecnológica: redes de sensores inalámbricos. WSN consiste en un gran número de sensores que recolectan data e inter operan entre ellos para llevar a cabo funciones de seguimiento, monitorización o control.

WSN, las cuales son consideradas como un caso especial de MANET con movilidad reducida o ninguna movilidad, se espera que encuentren un despliegue cada vez mayor en los próximos años, ya que permiten un control fiable y el análisis de entornos desconocidos y no probados.

El desarrollo de este tipo de redes fue motivado por aplicaciones militares como la vigilancia del campo de batalla y es ahora utilizado en una variedad de fenómenos físicos de interés: monitorización de tráfico vehicular y terrestre, reporte de las condiciones de vida de animales salvajes para la conservación del medio ambiente, detección de incendios forestales para tener una respuesta rápida y efectiva y por último monitorización de procesos industriales de aplicaciones para el cuidado de la salud. (Zhao, 2004)

II.2.2.1. Características Resaltantes

Facilidad de Implementación

Los sensores inalámbricos pueden ser implementados (soltados desde un avión o colocados en un fábrica) en el sitio de interés sin ninguna organización previa, por lo que se reducen los costos y el tiempo de instalación además de incrementar la flexibilidad de implementación.

Tolerancia a Fallos

Con macro sensores, el fallo de los nodos haría que el área de interés quede completamente sin monitorización hasta que el mismo sea remplazado. Con sensores inalámbricos, el fallo de un nodo no afecta el funcionamiento de la red sustancialmente ya que existen otros nodos adyacentes colectando data similar. Como mucho, se reduciría la precisión de la data recolectada.

Implementación de Red y Seguridad

Los sensores tienen un poder computacional limitado por lo que no son capaces de correr protocolos de red sofisticados o algoritmos de autenticación y encriptado, lo cual conlleva a nodos ligeros con versiones sencillas de protocolos de enrutamiento e implementaciones de seguridad. Además, dos modos de operación o estados son definidos para cada nodo, despierto y dormido, en caso de que el nodo

deba estar encendido o no, para que así las implementaciones de protocolos algoritmos tengan en cuenta estas limitaciones.

Data Centralizada

En redes tradicionales, la información es solicitada desde un nodo en específico. WSNs son data céntricas: la información es solicitada basado en ciertos atributos. Una dirección basada en atributos se compone de un conjunto de pares de consulta atributo-valor. Por ejemplo, si la consulta es “temperatura > 35°C”, entonces sólo aquellos sensores que estén midiendo por encima de 35 °C tendrán la necesidad de responder e informar de sus lecturas, mientras que el resto de sensores permanecerán en el estado dormido. Una vez un evento de interés es detectado, el sistema debería de ser capaz de configurarse automáticamente para obtener resultados de alta calidad. (Prakash, 2006)

Movilidad

Como los sensores inalámbricos están equipados con baterías, estos pueden presentar una movilidad limitada. Por ello, si una región deja de estar monitorizada se puede hacer que los nodos se reorganicen ellos mismos.

Conservación de Energía

Los sensores utilizan su suministro de energía llevando a cabo los cálculos y la transmisión de información en un entorno inalámbrico. Como tal, las formas de conservación y ahorro de energía en cuanto a las funciones de comunicación y cómputo son cruciales, ya que la vida útil del nodo tiene una gran dependencia a la vida de la batería.

II.2.2.2. Aplicaciones

Red Ecológica de Micro-Sensores Remotos

Proyecto de investigación a cargo de la Universidad de Hawaii que ha construido una red inalámbrica de sensores ambientales para la investigación de especies de plantas que crecen en determinadas áreas. Se implementaron sensores camuflados en los volcanes del Parque Nacional de Hawaii, donde dos tipos de data fueron recolectadas: información climatológica, recolectada cada diez minutos e información en forma de imágenes recolectadas cada hora. Los usuarios utilizaban Internet para acceder a la data desde un servidor ubicado en la Universidad de Hawaii en Manoa (Biagioni, 2005).

Sistema de Observación Ambiental

EOFS (*Environment Observation and Forecasting System*) es un sistema distribuido que se extiende por grandes áreas geográficas y monitoriza, modela y pronostica procesos físicos tales como contaminación ambiental o inundaciones. CORIE es un prototipo de EOFS para el río Columbia (Oregon, EE.UU.) que integra una red de sensores en tiempo real, un sistema de gestión de datos y modelos numéricos avanzados. Aproximadamente 13 sensores estacionarios fijos a un muelle están implementados a lo largo del estuario del río Columbia, mientras que la estación de sensores se encuentra en la costa. Los sensores estaciones son alimentados por una red de energía eléctrica, mientras que la estación de sensores utiliza paneles solares para aprovechar la energía solar. Los datos del sensor se transmiten a través de enlaces inalámbricos hacia estaciones maestras ubicadas en tierra que, a su vez, retransmiten los datos a servidores centralizados donde sirve como entrada a un modelo computacional del ambiente utilizado para pronósticos sobre el proceso físico estudiado (Dang, 2007).

Gestión de Socorro en Desastres

Una nueva arquitectura de redes de sensores ha sido propuesta en el proyecto (Cayirci, 2007), la cual podría ser útil en grandes catástrofes incluyendo terremotos, tormentas, inundaciones, incendios y ataques terroristas. Los nodos de sensores se despliegan al azar en hogares, oficinas y otros lugares antes de la catástrofe; los nodos de recogida de datos se comunican con servidores de datos para una determinada sub área y los cuales están conectados a una base central de datos para actualizaciones continuas. En base a los datos estadísticos del terremoto de Izmit en 1999, varias curvas de rendimiento son obtenidas para indicar el número promedio de sensores activos requeridos para detectar un desastre, la probabilidad de que el desastre estará dentro del rango de detección y el número total de fallos en los nodos debido al agotamiento de la energía.

Vigilancia o Monitorización Sanitaria

Un ejemplo de tal aplicación es la retina desarrollada dentro del proyecto SSIM (*Smart Sensors and Integrated Microsystems*), donde un chip prostético de retina, el cual consiste en centenas de micro sensores, se construyen e implantan dentro del ojo humano permitiendo a pacientes con una visión limitada o nula poder ver a un nivel aceptable. Comunicaciones inalámbricas son requeridas para satisfacer la necesidad de control de respuesta, identificación y validación de imagen. (Schwiebert, 2001)

II.2.3. VANET (*Vehicular Ad-Hoc Network*)

Los sistemas de control de tráfico tradicionales están basados en infraestructuras centralizadas donde las cámaras y sensores son implementados a lo largo de las calles recolectando información sobre el estado de la densidad del tráfico, transmitiendo dicha información a una unidad central de procesamiento para procesarla y tomar decisiones adecuadas en base a la misma. Este tipo de sistemas

son bastante costosos en términos de implementación y están caracterizados por un tiempo de reacción considerablemente alto en el procesado y transmisión de la información en un contexto donde el retardo de transmisión es vital y extremadamente importante para este tipo de sistemas. Sin embargo, con el rápido desarrollo de las tecnologías de comunicación inalámbrica, una nueva arquitectura descentralizada, basada en comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) ha creado interés en los últimos años en los fabricantes de vehículos, la comunidad de innovación y desarrollo y las operadoras de telecomunicaciones. Por lo tanto, un nuevo concepto nació: Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANET), lo que es más que una simple aplicación específica de las tradicionales Redes Ad-Hoc Móviles (MANET).

Estas redes han emergido recientemente como una plataforma para apoyar comunicaciones inteligentes entre vehículos para mejorar la seguridad vial. Las características de estas redes limitadas por las carreteras y la alta movilidad de los vehículos, su fuente de energía limitada y la aparición de infraestructuras inalámbricas al borde de las vías hacen de las VANETs un tema de investigación difícil y prometedor.

El enorme potencial de la conectividad coche a coche, se debe fundamentalmente al constante crecimiento del mercado automotor y la creciente demanda para el aumento de la seguridad vial. Algunas cuestiones relacionadas con la arquitectura, enrutamiento, seguridad, rendimiento y calidad de servicio deben ser investigadas. Es necesario poner especial atención en asegurar la interoperabilidad a través de la estandarización de los protocolos e interfaces con el fin de permitir la comunicación entre vehículos a pesar de provenir de diferentes fabricantes.

II.2.3.1. Características Resaltantes

Capacidad de Procesado, Energía y Comunicación

Contrario al contexto de MANETs en donde la limitación energética representa uno de los mayores retos, los vehículos dentro de las VANETs no tienen limitación en términos energéticos, tienen una gran capacidad de procesado y soportan diferentes interfaces de comunicación.

Entorno y Modelo de Movilidad

Los entornos considerados en VANETs a menudo están limitados a espacios abiertos o interiores. Los movimientos de vehículos están conectados a la infraestructura vial, en las carreteras o dentro de un área metropolitana. Las restricciones impuestas por este tipo de ambientes, tales como obstáculos debido a edificios, efectos de trayectoria múltiple y desvanecimientos, afectan considerablemente el modelo de movilidad y la calidad de la transmisión radio.

Tipo de Información y Difusión

Dado que una de las aplicaciones clave para VANETs es la prevención y la seguridad vial, el tipo de comunicaciones se centrará en la difusión de mensajes desde una fuente hasta varios receptores. Sin embargo, los vehículos afectados por esta difusión dependen de su ubicación y su grado de implicación en el evento. En tales situaciones, las comunicaciones son principalmente unidireccionales.

Topología de Red y Conectividad

A diferencia de las redes Ad-Hoc, las VANETs se caracterizan por una movilidad muy alta debido a la velocidad de los vehículos. Por lo tanto, un elemento puede rápidamente unirse o abandonar la red en un tiempo muy corto, lo que hace que existan cambios frecuentes en la topología. Las soluciones deben considerar esta limitación en donde la conectividad es uno de los parámetros clave. Además, las propiedades inherentes a VANETs, especialmente en términos de tamaño, crean

problemas de escala en los que es necesaria la revisión completa de soluciones existentes.

Seguridad

La sensibilidad de los datos transmitidos sobre una VANET demuestra una gran necesidad de seguridad. De hecho, la importancia de seguridad en este contexto es vital debido a las graves consecuencias resultantes de una violación o un ataque. Además, con un ambiente altamente dinámico, caracterizado por la llegada y salida casi instantánea de vehículos, el despliegue de una solución de seguridad debe hacer frente a una configuración específica en limitaciones.

II.2.3.2. Retos

Enrutamiento

En las redes vehiculares la movilidad es constante. Este hecho provoca cambios muy rápidos en la topología de la red e implica la necesidad de reconfigurar la tabla de enrutamiento de cada nodo. La partición de red frecuente dentro de VANETs requiere un enfoque diferente.

Seguridad

La seguridad es un tema que debe ser cuidadosamente tratado y evaluado en el diseño de sistemas de comunicación vehicular. En redes cableadas, el usuario debe acceder al cable físico si desea obtener la información proveniente de la red. Sin embargo, las comunicaciones inalámbricas son débiles desde este punto de vista, debido a que utilizan el aire como medio de transmisión. Este problema se agrava en redes vehiculares, debido a la inexistencia de infraestructura que proporcione servicios de seguridad centralizados como autenticación de usuarios o cifrado de paquetes. El tema a tratar incluye confianza, flexibilidad y eficiencia.

La privacidad también es considerada como un problema de gran importancia. El anonimato debe ser preservado haciendo imposible el seguimiento de un vehículo para entes no confiables. No tomar en cuenta la privacidad de los usuarios podría resultar en múltiples demandas después de haber sido implementada la red.

Calidad de Servicio (QoS)

La calidad de servicio en redes alámbricas es proporcionada por diferentes mecanismos de reserva de recursos. Sin embargo, la ejecución de estos mecanismos es muy compleja debido a las características especiales de VANETs, como la alta movilidad de los nodos y la gran cantidad de posibles nodos (parque automotor). Hoy en día, existen algunas propuestas, sin embargo la mayoría de ellas son teóricas, están simuladas o implementadas con un número reducido de nodos.

Gestión de Energía

La administración de energía en VANETs no se centra en la eficiencia energética, si no más bien en la potencia de transmisión. Cuando la potencia de transmisión en curso es demasiado alta podría interrumpir o interferir la transmisión de otro nodo. Así, que a medida que la red sea más densa, la potencia de transmisión utilizada debería de ser menor.

II.2.3.3. Aplicaciones

Aplicaciones Relacionadas con Seguridad

Las aplicaciones relacionadas con seguridad son el tipo de aplicaciones más importante dentro de las VANETs debido a su objetivo principal: disminución de lesiones, accidentes y muertes debido a accidentes de tráfico. En este contexto, la Comisión Europea está realizando un importante esfuerzo para investigar, desarrollar e implementar estos servicios con el fin de que surtan efecto tan pronto como sea posible.

- *Cooperative Collision Avoidance*: Este servicio consiste en ayudar a la conducción mediante la detección de posibles obstáculos en el camino. Una de estas aplicaciones sería la de notificaciones de emergencia. En el caso de un accidente o un frenado brusco, se envía una notificación a los vehículos próximos. Esta información podría ser propagada por los coches que conducen en dirección opuesta y, por tanto, transmitida a los vehículos que se puedan encontrar con el accidente.
- *Cooperative Driver Assistance System*: Este servicio aprovecha el intercambio de datos entre vehículos. La idea básica es la ampliación del alcance de la percepción del conductor yendo más allá de su campo de visión, ayudándolo con aplicaciones de asistencia autónomas. Al transmitir estos datos a los vehículos circundantes en la misma carretera, los conductores podrían obtener información acerca de peligros, obstáculos o el flujo de tráfico dando lugar a una conducción más segura y eficiente.
- eCall: Proyecto de la Comisión Europea con la finalidad de brindar asistencia inmediata a los conductores envueltos en accidentes de tráfico en cualquier lugar dentro de la Unión Europea. En caso de accidente, un vehículo equipado con tecnología eCall automáticamente llamaría al centro de emergencia más cercano, incluso si ningún pasajero está en condiciones de realizar la llamada.

Aplicaciones de Confort

El objetivo general de estas aplicaciones es mejorar la comodidad de los pasajeros y la eficiencia de tráfico. Esto podría incluir la localización de los puntos de interés más cercanos, información actual sobre el tráfico y el clima y comunicaciones interactivas. Todo tipo de aplicaciones que se puedan ejecutar sobre la pila de protocolos TCP/IP pueden desarrollarse en este tipo de aplicaciones,

Además, estos servicios pueden ser integrados con pagos de peaje o sistema de pagos electrónicos. Una característica fundamental de las aplicaciones de tipo comercial o de tipo confort es que no deben interferir con las aplicaciones de

seguridad; en este contexto la priorización del tráfico y el uso de diferentes canales físicos para separar dichos tipos de aplicaciones son soluciones viables.

Aplicaciones Administrativas

- **Identificación de Vehículos:** Este servicio proporciona una manera rápida y segura de suministro de información de los vehículos sin necesidad de detenerlos. Será necesaria una legislación adecuada para permitir que cada vehículo almacene la información necesaria en formato electrónico y su transmisión automática si es requerida por un dispositivo autorizado.

II.2.4. HSVN (*Hybrid Sensor Vehicular Network*)

HSVN consiste en hacer trabajar en conjunto redes de tipo WSN y VANET para constituir un marco de comunicaciones que pueda ser utilizado por los vehículos con el fin de ayudar a los conductores en el proceso de manejo, reduciendo lesiones, muertes y accidentes de tráfico.

Estas redes representan un concepto innovador en cuanto a implementación de redes de sensores dentro de las carreteras, por lo que una nueva arquitectura de red fue creada. El propósito de HSVNs es que los coches sean capaces de monitorizar las condiciones de los eventos meteorológicos, tales como lluvia, hielo, entre otros, así como también la densidad de vehículos en secciones de vía remotos.

La idea es que una red WSN se encargue de recolectar la información acerca de las condiciones meteorológicas y de tráfico, mediante los sensores distribuidos en las vías de comunicación. La información sería difundida entre los vehículos cercanos para luego ser transmitidos de vehículo en vehículo mediante una red VANET.

Uno de los puntos más importantes de este tipo de redes es que las comunicaciones entre WSN y VANET hacen posible extender el radio de cobertura

de la VANET a regiones más amplias, gracias a la cooperación de los nodos Ad-Hoc de ambas redes.

El contenido de los mensajes intercambiados referentes a la seguridad vial aún tiene que ser definido. Los mensajes tienen que incluir información sobre las condiciones de las vías de comunicación y su densidad, y podría incluir una imagen de baja calidad de las siguientes intersecciones, permitiendo al conductor y/o al copiloto de tener una visión rápida de las condiciones de la vía más adelante, en tiempo real.

Capítulo III

Marco Metodológico

Para estructurar de manera coherente y secuencial las etapas de desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, se dividió el proyecto en cuatro fases que abarcan cada uno de los objetivos planteados, según se describe a continuación:



Figura 2. Esquema de las fases de elaboración del Trabajo Especial de Grado.

Fuente: Autoría Propia.

En la Tabla 1 se muestran cada una de las actividades que se llevaron a cabo para la ejecución de cada fase que representa la metodología realizada.

Tabla 1. Etapas de elaboración del Trabajo Especial de Grado.

Fase	Actividades
I	<ul style="list-style-type: none"> a) Familiarización con proyectos de investigación previos del Grupo de Investigación. b) Instalación máquina virtual. c) Instalación simulador de redes NCTUns.
II	<ul style="list-style-type: none"> a) Diseño del marco de una ciudad inteligente. b) Diseño del sistema de recolección y procesado de estadísticas de tráfico.
III	<ul style="list-style-type: none"> a) Modificación del código fuente del simulador de redes NCTUns. b) Configuración parámetros de la simulación para los escenarios de la ciudad inteligente.
IV	<ul style="list-style-type: none"> a) Comprobación del correcto funcionamiento del nuevo código del simulador de redes NCTUns. b) Comprobación del funcionamiento del sistema de recolección y procesado de estadísticas de tráfico.

Fuente: Autoría Propia.

III.1. Fase I: Investigación Inicial

Comprendió el estudio y recopilación de información relacionada con el proyecto, así como la instalación de la máquina virtual y el simulador de redes a utilizar en el proyecto.

Se recopilaron los proyectos previos del grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universidad Politécnica de Catalunya

(UPC) para la familiarización con el tema de investigación y la metodología de trabajo del mismo.

Una vez definidos los lineamientos de investigación de este Trabajo Especial de Grado, se procedió a la instalación de la máquina virtual en la cual se ejecutaría el simulador de redes, el cual simulará la Ciudad Inteligente y por ende el sistema de recolección y procesado de estadísticas de tráfico a diseñar.

III.2. Fase II: Diseño Teórico de la Ciudad Inteligente

En esta fase se llevó a cabo el diseño general de la Ciudad Inteligente a simular. Esta ciudad inteligente está basada en la zona de L'Eixample dentro de la ciudad de Barcelona, España, y será el punto de partida para el diseño e implementación del sistema de recolección y procesado de estadísticas de tráfico.

Una vez diseñado el marco de la ciudad de inteligente se procedió al diseño del sistema estadístico teniendo en consideración todas las tecnologías de comunicación inalámbricas estudiadas en los pasos previos. Se decidió la utilización de una red de comunicación híbrida (HSVN) para la implementación del sistema, teniendo en cuenta aplicaciones que puedan ser añadidas en un futuro cercano. Este sistema estadístico sería calculado por algunos semáforos distribuidos a lo largo de la ciudad, los cuales llamaremos Semáforos Inteligentes (SI), y se comunicarán directamente con los vehículos utilizando una red vehicular (VANET) por medio del protocolo de enrutamiento AODV, *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*, el cuales un protocolo reactivo diseñado para redes inalámbricas Ad-Hoc.

III.3. Fase III: Modificación y Configuración del Simulador de Redes

Una vez diseñada la ciudad inteligente y el sistema estadístico, se procedió a modificar el código fuente del simulador de redes seleccionado (NCTUns) para implementar el sistema dentro del mismo y ser capaces de simularlo y evaluarlo en condiciones lo más realistas posible.

Como se mencionó anteriormente el sistema se basa en la utilización del protocolo de enrutamiento AODV, por lo que dichos módulos fueron los que se modificaron en mayor grado para añadirle esta nueva funcionalidad, diseñada previamente, al simulador.

III.4. Fase IV: Prueba de Funcionamiento

Ya modificado y configurado el simulador de redes se procedió a la prueba de funcionamiento del sistema de recolección y procesado estadístico mediante la simulación de un entorno controlado en el cuál se conoce previamente cómo debería ser el comportamiento del sistema en dicha situación.

Al encontrarse algún tipo de malfuncionamiento o alguna situación que no estaba considerada en la fase de diseño del sistema, se procedió a la adición de dichas mejoras en el código y a volver a la fase de prueba de funcionamiento.

Se repitió el paso anterior las veces que fueran necesarias hasta observar que el comportamiento del sistema estadístico se asemejaba al comportamiento teórico esperado por el grupo de investigación, tomando en cuenta también la estabilidad del simulador durante las ejecuciones de simulación.

Capítulo IV

Desarrollo

A lo largo de este Trabajo Especial de Grado se han reiterado las razones y motivos por los cuales se lleva a cabo un Sistema Recolección y Procesado de Estadísticas referentes a la densidad y el retardo del tráfico.

El desarrollo de este proyecto se estructuró de manera general en cuatro (4) fases que son las siguientes:

- ✓ Fase I: Investigación Inicial.
- ✓ Fase II: Diseño Teórico de la Ciudad Inteligente.
- ✓ Fase III: Modificación y Configuración del Simulador de Redes.
- ✓ Fase IV: Prueba de Funcionamiento.

En este capítulo se detalla de manera más específica, cómo fueron desarrolladas cada una de las fases que componen los objetivos específicos de este Trabajo Especial de Grado.

IV.1. Fase I: Investigación Inicial

Como su nombre lo indica, esta fase se basó en la investigación y estudio de los diferentes factores que componen el proyecto. Se dividió en tres (3) etapas que son explicadas a continuación.

IV.1.1. Estudio de la Ingeniería Conceptual

Para la elaboración de este proyecto fue necesario el estudio de los diferentes sistemas de comunicación existentes para la implementación de redes vehiculares. Se estudiaron las tecnologías y protocolos de enrutamiento de dichos sistemas, para conocer sus características principales, ventajas y desventajas. De igual manera, se estudiaron los diferentes simuladores de red del mercado, buscando el que mejor se adaptara a las características y exigencias del proyecto para la simulación del marco de una Ciudad Inteligente. Una vez establecidas las prioridades del proyecto, las cuales eran implementar y probar un sistema de recolección y procesado estadístico, se procedió a la instalación y configuración de la máquina virtual en donde se ejecutaría tanto el simulador de redes como las emulaciones de la Ciudad Inteligente.

IV.1.2. Instalación Máquina Virtual

Este proyecto consiste en un entorno de simulación de redes VANET en el cual se implementará y probará un sistema de adquisición y procesado estadístico. El simulador de redes utilizado para este propósito es NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*) en su versión 6.0.

NCTUns 6.0 es un *software* libre de código abierto. Posee una tecnología de núcleo basada en la innovadora metodología de re-entrada de *kernel* inventada por el Profesor S. Y. Wang cuando cursaba su doctorado en la Universidad de Harvard. Debido a esta nueva metodología, NCTUns ofrece diversas ventajas únicas que no pueden ser obtenidas fácilmente por simuladores de redes tradicionales.

Este simulador de redes necesita un Sistema Operativo UNIX para ser utilizado. NCTUns normalmente es ejecutado sobre el SO Fedora 11. En este proyecto se evitó la instalación del sistema operativo referido en una computadora personal y se creó una máquina virtual para ejecutar tanto el SO como el simulador de redes.

Una máquina virtual es una implementación de *software* de una computadora que ejecuta programas como una máquina física. La máquina virtual utilizada en el proyecto es una máquina virtual de sistema, la cual proporciona una plataforma completa que permite la ejecución de un sistema operativo completo. Una característica esencial de las máquinas virtuales, es que el software ejecutándose dentro de ella está limitado a los recursos y abstracciones dadas por la máquina anfitriona. De este modo, una máquina virtual permite al usuario ejecutar un sistema operativo diferente al que presenta la máquina anfitriona, sin necesidad de instalarlo.

IV.1.2.1. Requerimientos del Sistema

Para instalar y utilizar el simulador NCTUns algunos requerimientos mínimos en términos de *hardware* y *software* son necesarios, los cuales se muestran en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2. Requerimientos Mínimos para NCTUns.

Sistema Operativo	Hardware	Software
➤ Fedora 7.0	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1.6 GHz Procesador ➤ 256 Mb RAM ➤ 300 Mb Disco Duro 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ gcc Compilador ➤ Administrador log-in

Fuente: Autoría Propia.

En este Trabajo Especial de Grado el ordenador utilizado cumple con las siguientes características:

- Procesador: Intel® Core™ i3 CPU M 330 @ 2.13 GHz.
- Memoria RAM: 4.0 GB (3.87 GB utilizables).
- Memoria Libre Disco Duro: 260 GB.

Cuando se ejecuta la máquina virtual por primera vez, debe ser elegida la cantidad de memoria RAM dedicada a la máquina virtual. En este caso se eligieron 2 GB al ser la cantidad recomendado por el software de virtualización.

IV.1.2.2. Descarga Software Virtualización (VMware Player)

El primer paso fue la descarga del software de virtualización VMware Player, aplicación gratuita que permite ejecutar múltiples sistemas operativos de forma concurrente en una computadora. El software puede ser descargado en la página de Internet de VMware (VMware).

Para instalar VMware, obtener la guía de inicio *Starting Guide* en el capítulo cuatro (4) se dispone de toda la información necesaria. Esta guía puede ser descargada de la página de Internet de VMware (VMware). Una vez instalado el *software*, un ícono del programa apareció en el escritorio permitiendo la ejecución del mismo.

IV.1.2.3. Descarga Máquina Virtual Fedora 11

El segundo paso consistió en la descarga de la máquina virtual. Esta máquina fue creada por Daniel Navarro, y fue descargada desde el servidor del *Departament d'Enginyeria Telemàtica* (Entel). La localización de la descarga de la máquina virtual fue: <http://bowie.upc.es/vmware/vm-fedora.tgz> (ENTEL).

Esta máquina virtual es una imagen del SO Fedora 11 (Sistema Operativo basado en un kernel Linux, y es el SO oficial para soportar NCTUns). Una vez descargada la máquina virtual, puede ser ejecutada utilizando el software de virtualización.

IV.1.2.4. Ejecución Máquina Virtual

Luego de haber descargado la máquina y haberla extraído del fichero “.zip” la máquina virtual ya está lista para ser ejecutada a través del software de virtualización. Para hacerlo, el VMware Player debe ser abierto y algunos consejos sobre compatibilidad aparecerán en pantalla, los cuales deberán ser aceptados. Una vez encendida la máquina virtual un GNU GRUB (*Grand Unified Bootloader*) aparece en la pantalla para seleccionar cual de los múltiples sistemas operativos se desea *bootear* o seleccionar una configuración específica de kernel para un SO en particular. La configuración de kernel que se debe seleccionar en la máquina virtual es NCTUNS y se debe introducir el siguiente usuario y contraseña como muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Sesión Máquina Virtual.

User	nctuns
Password	nctuns

Fuente: Autoría Propia.

IV.1.3. Instalación simulador de redes NCTUns

IV.1.3.1. Arquitectura y Metodología de Simulación en NCTUns

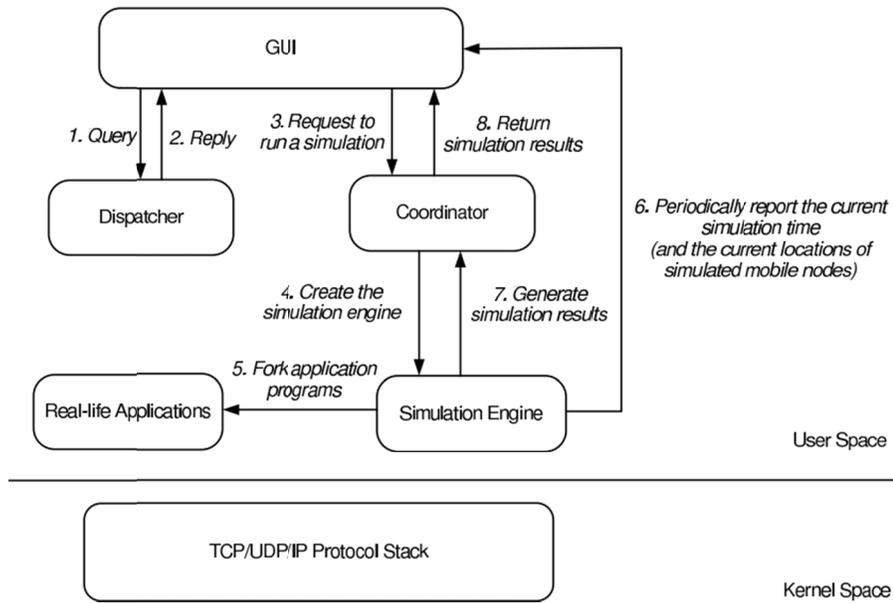


Figura 3. Arquitectura NCTUns.

Fuente: Wang, 2010.

Graphical User Interface (GUI)

NCTUns ofrece un programa de interfaz gráfica de usuario llamada *NCTUnsclient* dentro de sus paquetes, el cual ofrece facilidades útiles para los usuarios para crear eficientemente casos de simulación y emulación. De acuerdo con las necesidades comunes de los usuarios, agrupa las operaciones de generación de simulaciones o emulaciones en cuatro modos de trabajo que serán detallados más adelante: *Draw Topology*, *Edit Property*, *Run Simulation* y *Play Back*.

Dispatcher

NCTUns ofrece una arquitectura de simulación flexible, por medio de la cual se permite ejecutar el programa GUI y el motor de simulación desde dos máquinas

diferentes. En NCTUns, el programa GUI no necesita encontrar un servidor de simulación para realizar una simulación. En cambio, envía un mensaje de consulta al Dispatcher para conocer qué servidor de simulación está disponible. El Dispatcher es responsable de monitorizar los estatus de los servidores de simulación que gestiona y seleccionar algunos de ellos que este disponible para atender la solicitud de simulación enviada por el programa de interfaz gráfica.

Coordinator

El programa de coordinación tiene las siguientes cuatro (4) tareas:

- 1) Procesar los comandos enviados por el Dispatcher.
- 2) Crear procesos de simulación para ejecutar simulaciones.
- 3) Reportar los estatus de los procesos creados al Dispatcher.
- 4) Recolectar los resultados de las simulaciones y enviarlas al programa GUI.

Simulation Engine

Se compone de un conjunto de módulos de protocolos diferentes y un planificador de eventos. El primero es el responsable de simular el comportamiento de los protocolos mientras que el segundo es responsable de la programación de eventos en un orden no decreciente en función de marcas de tiempo. Además durante la simulación el proceso encargado de la simulación reportará periódicamente el tiempo de simulación actual al programa de interfaz gráfica.

Application Program

Son responsables de generar el tráfico de red en una red simulada. Casi la totalidad de aplicaciones de la vida real pueden ser directamente ejecutadas en un nodo simulado por NCTUns para la generación de tráfico de red realista.

Kernel Patches

NCTUns utiliza la pila de protocolos de red del SO Linux para la simulación de los protocolos de la capa de transporte, como TCP, UDP o IP. Modificaciones menores a

los temporizadores Linux son requeridas para que puedan ser utilizados por la pila de protocolos del núcleo de cada uno de los nodos simulados y puedan aumentar sus marcas temporales basados en el reloj de simulación (NCTUns) en vez de basarse en el reloj del SO.

IV.1.3.2. Pasos Simulación en NCTUns

Para la simulación de redes, lo primero que se debe hacer es ejecutar NCTUns. Para hacerlo, un terminal debe ser abierto obteniendo los privilegios que otorga *root*. Para la obtención de dichos privilegios se debe introducir el comando “su”, y luego introducir la contraseña “admintid33”.

Para la ejecución de NCTUns con el fin de simular redes VANET, WSN y HSVN, tres de los componentes de NCTUns, mencionados anteriormente, deben ser ejecutados. Se trata del *Dispatcher*, *Coordinator* y el *NCTUnsclient* (interfaz gráfica). Para hacerlo, se deben ejecutar los siguientes comandos en un terminal con privilegios de *root*: “dispatcher&”, “coordinator&” y por último “nctunsclient&”.

En general, cualquier simulación generada con NCTUns debe de completar cuatro (4) etapas. Cada etapa debe ser hecha con cada uno de los modos de la interfaz gráfica (GUI), los cuales se describen a continuación:

Draw Topology

En este modo, se pueden insertar nodos de red, crear enlaces, así como especificar las ubicaciones y los patrones de movimiento de los nodos móviles. Además, el programa de interfaz gráfica ofrece un completo conjunto de herramientas para construir carreteras, fundamental para la simulación de VANETs.

Edit Property

En este modo, el ícono que representa un nodo de una red puede ser seleccionado mediante un doble-clic para la configuración de sus propiedades, como

por ejemplo la pila de protocolos utilizado, las aplicaciones que ejecutará dicho nodo durante la simulación, el agente de movilidad, el radio de cobertura de su antena, entre otros.

Run Simulation

En este modo, el programa de interfaz gráfica proporciona al usuario un conjunto de comandos para iniciar, pausar y detener la simulación en progreso. El progreso de la misma puede ser controlado fácilmente con sólo pulsar un botón en el panel de control de la interfaz gráfica.

Play Back

Después de que una simulación finaliza, el programa de interfaz gráfica cambiará automáticamente al modo de Reproducción y leerá el archivo de traza generado durante la simulación. En este modo, se puede utilizar el programa de interfaz gráfica para reproducir el envío/recepción de paquetes de un nodo de una manera animada.

IV.2. Fase II: Diseño Teórico de la Ciudad Inteligente

En un futuro próximo, las ciudades se comunicarán con las personas y los objetos que la habitan. Las ciudades del futuro, denominadas ciudades inteligentes, podrían comunicarse con personas, vehículos e infraestructura de tráfico haciendo la vida más cómoda para todos estos agentes.

Las ciudades inteligentes tradicionales pueden identificarse a lo largo de seis (6) ejes principales, los cuales serían: economía inteligente, movilidad inteligente, medio ambiente inteligente, personas inteligentes, modo de vida inteligente y por último gobierno inteligente. Estos ejes conectan con las teorías tradicionales y neoclásicas del crecimiento y desarrollo urbano. En particular, los ejes se basan en las teorías de la competitividad regional, la economía de transporte y tecnologías de

comunicación e información, los recursos naturales, el capital social y humano, la calidad de vida y la participación de los ciudadanos en el gobierno de las ciudades (Giffinger, 2007).

En esta sección se propone un marco de ciudad inteligente, en el cual se cubren los seis ejes mencionados anteriormente, sin embargo, el enfoque del marco se centra en las tecnologías de comunicación e información. Dentro del marco, diferentes redes Ad-Hoc serán establecidas para la implementación de un sistema de recolección y procesamiento de estadísticas de tráfico.

IV.2.1. Marco de la Ciudad Inteligente

En el marco propuesto los semáforos tradicionales se convierten en Semáforos Inteligentes (SI). Estos SI pueden comunicar información, como condiciones climáticas o estadísticas del tráfico, a los vehículos circundantes y otras redes de tipo Ad-Hoc, por ejemplo WSN. Al mismo tiempo, estos SI pueden recibir mensajes de los vehículos que pasan recogiendo estadísticas de dichos vehículos, por ejemplo densidad o retardo de tráfico. Estos SI también conforman una sub-red entre ellos que les permite compartir la información recopilada por cada uno de ellos calculando estadísticas de toda la ciudad. Las siguientes secciones detallan el diseño de esta ciudad inteligente.

IV.2.2. Diseño de la Ciudad Inteligente

La Figura 4 muestra el diseño proyectado de la ciudad inteligente. En este diseño, la ciudad está modelada en bloques cuadrados con edificios en sus cuatro lados, representados por los obstáculos de color naranja. Los semáforos inteligentes son los responsables de gestionar el tráfico de los vehículos formando una VANET. Estos SI no tienen que ser colocados en todas las intersecciones de la ciudad, ya que

cada semáforo inteligente tiene un radio de cobertura que abarca la intersección donde se implementa y las cuatro (4) calles que convergen en dicha intersección. Por lo tanto, sólo algunos semáforos tradicionales serán reemplazados por SI lo que supone un ahorro significativo en cuanto a costes para la implementación del proyecto. Para poder dotar al semáforo inteligente de esta área de cobertura se utilizan antenas con diagramas de propagación omnidireccionales, por lo que cada SI recibe datos de todos los vehículos que transiten dentro de su área de cobertura (las cuatro calles y la intersección previamente mencionadas). Finalmente, los vehículos representados en la figura deben de estar equipados con tecnología inalámbrica la cual permita comunicaciones vehículo a vehículo y vehículo a infraestructura.

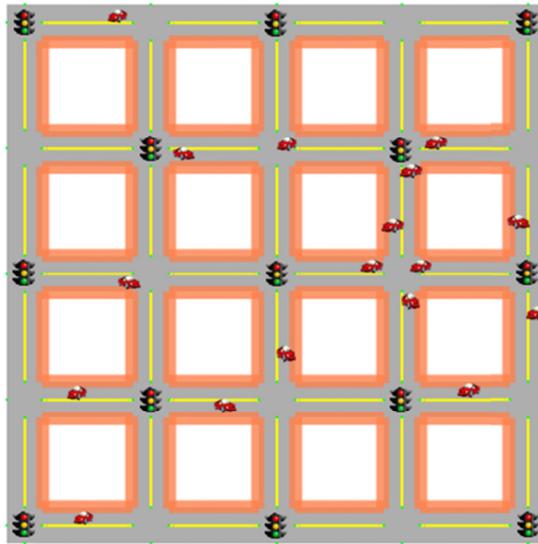


Figura 4. Diseño de la Ciudad Inteligente.

Fuente: Autoría Propia.

Cada SI estaría equipado con dos interfaces diferentes, *eth1* y *eth2*, cada una de ellas configurada con subredes que operan en modo Ad-Hoc, con AODV como protocolo de enrutamiento. La primera de ellas, 1.0.2.X/24 (*eth1*), utilizada para comunicaciones entre semáforos inteligentes, y la segunda de ellas, 1.0.3.X/24 (*eth2*) utilizada para la comunicación bidireccional entre vehículos y SI. Como los semáforos inteligentes pueden comunicarse entre sí mediante la interfaz *eth1*, estos

podrían compartir estadísticas acerca de la densidad y el retardo del tráfico, pudiéndose almacenar en una base de datos que contengan las estadísticas de toda la ciudad. Esto permitiría a un semáforo inteligente el acceso a la data correspondiente a cualquier área de la ciudad y enviarla al vehículo que la solicite.

La interfaz *eth2*, es utilizada tanto por los vehículos como por los semáforos inteligentes para enviar y recibir, respectivamente, los datos estadísticos referentes al tráfico. En un futuro diferentes estadísticas podrían ser agregadas y enviadas por esta interfaz. La distribución de los semáforos inteligentes así como la configuración de las interfaces de cada uno de ellos se muestra en la Figura 5.

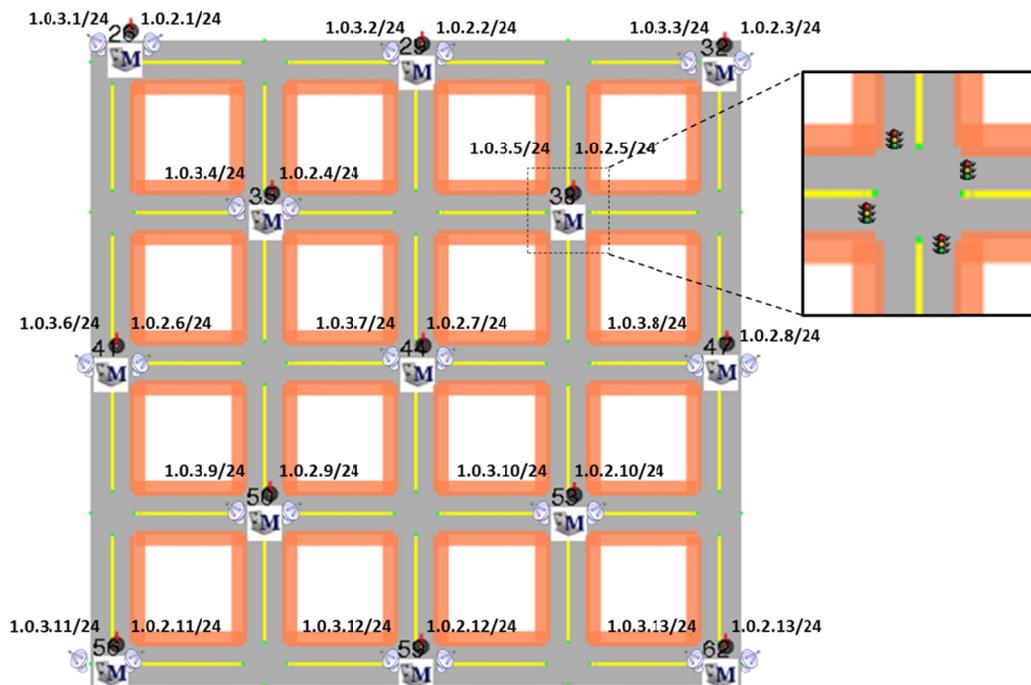


Figura 5. Configuración Interfaces Ciudad Inteligente.

Fuente: Autoría Propia.

También es mostrado en la Figura 5 como un Semáforo Inteligente (SI) no significa la eliminación de los semáforos regulares que se encuentren en la intersección donde se implementa el SI. De hecho, el diseño implica que un semáforo

inteligente asocia los cuatro (4) semáforos regulares de la intersección identificándolos con la misma dirección IP. Esto asegurará los procesos de control de tráfico y la recolección de estadísticas de tráfico.

En la Figura 6 se muestra la distribución de los semáforos inteligentes a lo largo de la ciudad, así como los identificadores utilizados para diferenciarlos (*ITL: Intelligent Traffic Light*).

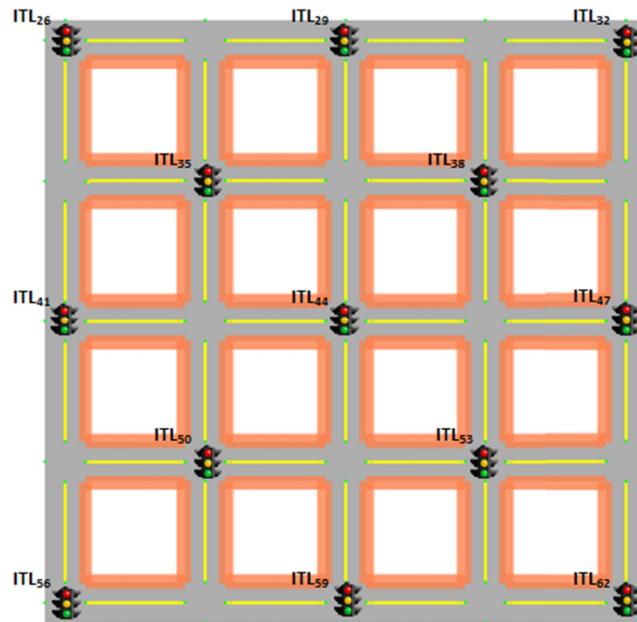


Figura 6. Implementación Semáforos Inteligentes en la Ciudad.

Fuente: Autoría Propia.

El diseño de la ciudad se inspiró en la ciudad de Barcelona, donde se desarrolló el proyecto. Por esta razón la longitud de las calles fue de cien (100) metros mientras que la longitud de las intersecciones fue de cuarenta (40) metros, como se muestra en la Figura 7.

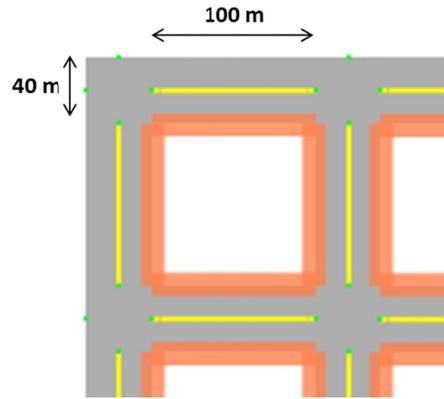


Figura 7. Implementación Semáforos Inteligentes en la Ciudad.

Fuente: Autoría Propia.

Conociendo la distancia de las calles e intersecciones que conforman la ciudad, fue posible determinar la distancia entre SI adyacentes, o el área de cobertura máxima deseada para un semáforo inteligente.

Por diseño se estableció que un semáforo inteligente otorgara cobertura a las cuatro calles que convergen en la intersección donde está implementado. Si el semáforo está implementado en el centro de la intersección para darle cobertura a lugar más alejado de cualquiera de las calles convergentes se necesitaría un radio de cobertura de 120 metros. Para la operación adecuada del sistema se decidió dar un margen adicional de cobertura por lo que el radio de cobertura de la interfaz *eth2* se fijó en 130 metros con un diagrama de propagación omnidireccional.

Usando la misma lógica, se determinó que SI consecutivos están separados dos calles, dos intersecciones completas y dos intersecciones medias, dando un total de 280 metros. En este caso el radio de cobertura para la interfaz *eth1* se configuró en 300 metros, también con un diagrama de propagación omnidireccional.

En la Figura 8 se explica gráficamente cómo fueron estimados los radios de cobertura de las interfaces *eth1* (color rojo) y *eth2* (color azul). Se puede apreciar que la interfaz *eth1* del ITL₁ se puede comunicar sin ningún problema con su similar del ITL₂ ya que entre ellos existe una línea de visión directa, asumiendo que todos los

semáforos fueron configurados con los mismos radios de cobertura para las dos interfaces. La interfaz *eth2* del ITL₁ no podría comunicarse con su similar del ITL₃ debido a los obstáculos representado por las paredes de color naranja. Por último, se puede apreciar como la interfaz *eth2* de cualquier semáforo inteligente le da cobertura a la intersección en la que está implementado así como también a las cuatro calles que convergen en ella.

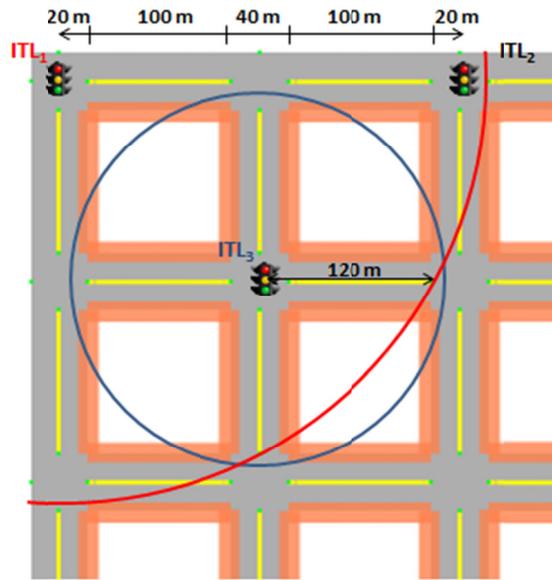


Figura 8. Implementación Semáforos Inteligentes en la Ciudad.

Fuente: Autoría Propia.

Los vehículos dentro de la ciudad fueron representados utilizando *ITS Cars* equipados con una interfaz 802.11b en modo Ad-Hoc. Estos vehículos tienen la característica que están controlados por un agente de movilidad interno del simulador el cual los desplaza a través de la ciudad respetando los límites de las vías, las intersecciones y los semáforos. Se configuraron con AODV como protocolo de enrutamiento, modificado para añadir el proceso de recolección estadística. Como los vehículos, en un principio sólo se debían comunicar con la interfaz *eth2* del semáforo

inteligente y otros vehículos que estuviesen a su alrededor, su radio de cobertura fue fijado en 130 metros con un diagrama de propagación omnidireccional.

IV.2.3. Diseño del Sistema de Recolección y Procesado Estadístico de Tráfico

IV.2.3.1. Gestión de la Densidad de Tráfico

Como se detalló anteriormente, el marco de la ciudad inteligente incluye semáforos inteligentes implementados en algunas intersecciones. Estos SI recolectan, en tiempo real, data sobre el tráfico a partir de los vehículos que pasan calculando estadísticas de tráfico como por ejemplo la densidad de vehículos. La forma en que cada semáforo inteligente recolecta la información de tráfico de su área de cobertura y calcula la estadística de densidad de coches es la siguiente:

- 1) Cada vehículo que se desplaza a través de la ciudad cuenta el número de coches vecinos cada dos segundos, enviando dicha información al semáforo inteligente más cercano.
- 2) El semáforo inteligente recibe correctamente la información y calcula el promedio de número de coches vecinos en su área de cobertura.
- 3) Con el promedio de los vehículos vecinos calculado, se determina la densidad de vehículos en el área mediante la utilización de dos umbrales adaptativos.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo del proceso de recolección de estadísticas de densidad de tráfico. En el ejemplo, el vehículo C_1 contabiliza tres vecinos dentro de su área de cobertura (C_2 , C_3 y C_4); aunque el coche C_7 también esté dentro del área de cobertura de C_1 no se puede establecer ningún tipo de comunicación entre ellos debido a los obstáculos simulados. Por otro lado, el vehículo C_5 no presenta vecinos por lo que envía un cero al semáforo inteligente más cercano (ITL_1).

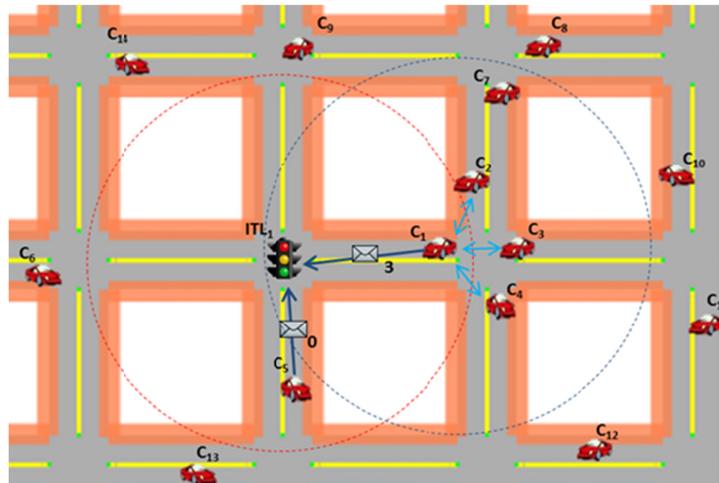


Figura 9. Ejemplo Recolección Estadística Densidad de Tráfico.

Fuente: Autoría Propia.

IV.2.3.2. Gestión del Retardo de Tráfico

Además de las estadísticas de densidad de tráfico los semáforos también calculan estadísticas del retardo del tráfico. Este retardo consiste en el tiempo invertido por un vehículo recorriendo una calle entera desde principio a fin. Esta estadística estaría directamente relacionada con la densidad de coches y en un futuro podría ser utilizada como una manera de determinar las rutas de navegación para los asistentes de viaje.

Para la implementación del cálculo de estadísticas de retardo del tráfico se discutió una idea general con el grupo de trabajo, la cual se muestra en la Figura 10 y se detalla a continuación:

Como se muestra en la Figura 10, la idea consiste en que a sabiendas de la posición que un vehículo tiene dentro de la ciudad, éste podría calcular la diferencia temporal durante el recorrido de una calle o avenida. Por ejemplo, en la figura anterior la posición inicial del vehículo se asocia con un valor temporal inicial t_0 , mientras que la posición final se asocia con un valor temporal t_1 . Como el vehículo

aún estaría dentro del área de cobertura del semáforo inteligente en el punto más alejado de la calle, podría enviarle la información estadística que en este caso sería el retardo. Para llevar a cabo esta idea dentro del simulador es importante conocer la posición de cada vehículo durante toda la simulación, para que así sea posible saber en qué momento un vehículo se encuentra en el inicio o el final de una calle. Por lo tanto, debe ser conocido y estudiado cómo los vehículos se trasladan alrededor de la ciudad durante la simulación.

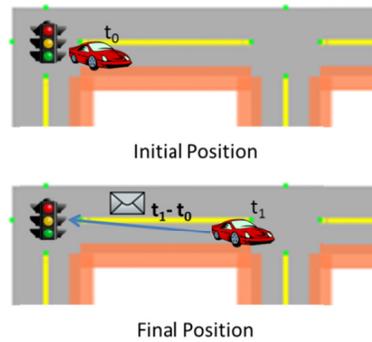


Figura 10. Idea Original Recolección Estadística Retardo de Tráfico.

Fuente: Autoría Propia.

En NCTUns los vehículos están representados con *ITS Cars*. Estos nodos tienen la característica que cuando son implementados dentro de las vías de la ciudad, estos pueden moverse de manera aleatoria de acuerdo a un agente de movilidad del simulador. Existen diferentes agentes de movilidad en NCTUns para la simulación de diferentes tipos de comportamiento de los vehículos. En este Trabajo Especial de Grado se estudió y modificó el agente *CarAgent*, el cual es el responsable de mover todos los vehículos alrededor de la ciudad teniendo en cuenta cruces, semáforos, otros vehículos y accidentes. Por ello, este agente debe modificar la velocidad de los vehículos dependiendo del entorno de cada uno de ellos, además de tomar la decisión de giro del vehículo en caso de que este se encuentre en una intersección.

Como el agente *CarAgent* tiene control total sobre el modelo de movilidad de los vehículos de la simulación, se concluyó que este módulo sería una parte fundamental en la implementación de las estadísticas de retardo de tráfico. El hecho de que este agente sabe cuando un vehículo está realizando una toma de decisión de giro, da la posibilidad de asociar el tiempo de simulación con este procedimiento y restarlo con el tiempo asociado a la toma de decisión de giro previa. Esta idea se muestra en la Figura 11:

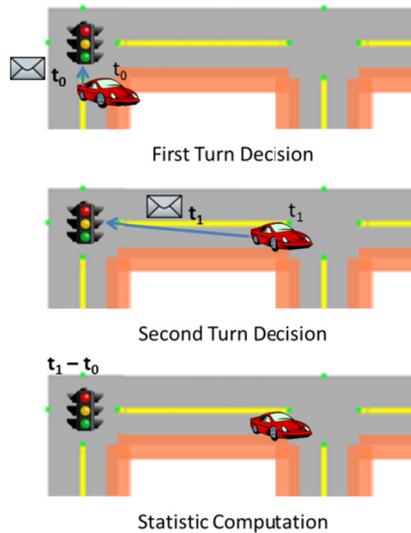


Figura 11. Idea Implementada Recolección Estadística Retardo de Tráfico.

Fuente: Autoría Propia.

La primera observación que se puede apreciar a partir de la Figura 11 es que el vehículo ya no envía al semáforo inteligente una diferencia temporal asociada al retardo, sino que envía el tiempo asociado a una toma de decisión de giro. Ahora, la diferencia temporal será calculada por el SI, por lo que es el responsable de restar tiempos consecutivos asociados al mismo vehículo. Con esta nueva idea, es fundamental la diferenciación de vehículos por parte del semáforo para que sea posible el cálculo efectivo de los retardos de cada vehículo.

Es importante resaltar que la idea original podría ser implementada en la vida real, ya que los vehículos tendrían todas las herramientas necesarias y la capacidad de cómputo para calcular la diferencia temporal asociado al recorrido de una calle enviándolo al semáforo inteligente más cercano. Los vehículos tienen una capacidad de procesamiento importante, no tienen restricciones energéticas y podrían basar las ubicaciones relativas de la calle utilizando un asistente de navegación o GPS.

IV.2.3.3. Envío de Mensajes Estadísticos de Tráfico

El primer paso en la recolección de estadísticas de tráfico de este sistema lo realizan todos los vehículos cada dos (2) segundos. Este paso consiste en tomar ventaja de las características del protocolo de enrutamiento, en este caso AODV. La primera característica que debe ser tomada en cuenta es que AODV es un protocolo de enrutamiento reactivo, lo que significa que sólo se crearán y almacenarán las rutas necesarias dentro de la información de enrutamiento. Esta información consiste en una tabla de vecinos, donde se almacenan todos los vecinos de un nodo móvil para un momento en particular.

Como este Trabajo Especial de Grado trabaja con redes VANET, los nodos poseen la capacidad de desplazarse alrededor del escenario cambiando la topología de red, rompiendo rutas existentes y creando otras nuevas en caso de ser necesario. Por esta razón el protocolo AODV debe de ser adaptativo. Para lograrlo, el protocolo asocia cada lista de vecinos con un tiempo de expiración, asegurando que sólo las rutas recientes sean válidas.

Conociendo el funcionamiento del protocolo AODV es posible explicar cómo los nodos (vehículos) realizan el conteo de los coches vecinos, tomando ventaja del protocolo de enrutamiento en uso. Este proceso consiste en los siguientes pasos:

- 1) **Conteo de Vecinos:** El vehículo consulta su tabla de vecinos y contabiliza cada entrada cuya identificación (ID) corresponda a un vehículo,

exceptuándose él mismo, y tenga un tiempo de expiración mayor al momento en que se realiza la consulta, lo que asegura que la ruta es aún válida. Los vehículos sólo contabilizarán las entradas que pertenezcan a la misma subred, en este caso la red VANET.

- 2) Determinación Destino: El vehículo consulta su tabla de vecinos todas las entradas cuya identificación pertenezca a un semáforo inteligente, comparando sus respectivos tiempos de expiración. El vehículo sólo obtendrá la dirección IP del SI con el mayor tiempo de expiración, asegurando previamente que dicho tiempo sea mayor que el momento de consulta. Este proceso asegura que dicho semáforo inteligente es el más cercano al vehículo.
- 3) Creación y Envío Mensaje Estadístico: Una vez determinado el número de vecinos y sabiendo la dirección IP destino del semáforo inteligente más cercano, el vehículo ensambla un mensaje estadístico *STAT_msg* con la estructura presentada en la Tabla 4, para luego ser enviado a dicho SI.

Tabla 4. Estructura Mensaje *STAT_msg*.

<i>STAT_msg</i>			
Campo	Descripción	Tipo Dato	Valor Defecto
Type	Statistic Message	Char	“AODV_STAT”
stat_type	Traffic Density	Int	0
	Traffic Delay		1
stat_my_id	Car Sending Statistics	Int	C_i
stat_neighbors	Number of Neighbors (NoN)	Int	NoN_i
stat_time	Moment of Computation	u_int64_t	t_i
stat_dst	ITL IP Address	u_long	ITL_i
stat_delay	Delay Time	u_long	Del_i

Fuente: Autoría Propia.

El campo *type* del mensaje es utilizado por el protocolo para diferenciar el tipo de mensaje con el que se trata, los cuales podrían ser *AODV_RREQ*, *AODV_RREP* o *AODV_RERR*. El campo *stat_type* es utilizado por AODV para diferenciar el tipo de estadística que contiene el mensaje: si su valor es cero se trata de un mensaje de densidad de tráfico y si su valor es 1 se trata de un mensaje de retardo de tráfico. En un futuro se podrían añadir diferentes tipos de estadística a esta estructura de mensaje. El campo *stat_my_id* contiene la identificación del vehículo que envía el mensaje estadístico. El campo *stat_neighbors* contiene el número de vecinos que el vehículo tuvo en un momento determinado. El campo *stat_time* contiene el momento en el que la estadística fue calculada por el vehículo. El campo *stat_dst* contiene la dirección IP destino asociada al semáforo inteligente más cercano al vehículo. Por último, el campo *stat_delay* contiene el valor temporal enviado por el vehículo asociado a una toma de decisión de giro.

Este proceso es repetido cada dos segundos. Este tiempo fue calculado teniendo en cuenta la velocidad máxima de los vehículos, la longitud de las calles, y el número promedio de mensajes estadísticos enviados dentro de una calle. En primer lugar, el grupo de investigación fijó que un vehículo debía enviar por lo menos 5 actualizaciones de su estado de tráfico (mensaje estadístico) en cada calle. Asumiendo el peor caso posible, en el que el vehículo se desplaza a velocidad máxima, se calculó el tiempo de repetición del proceso. La velocidad máxima de los vehículos por defecto en NCTUns es de 10 m/seg y a longitud de las calles es de 100 metros por lo que el cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$t_{min} = \frac{100 \text{ m}}{10 \text{ m/seg}} = 10 \text{ seg}$$

$$t_{repetición} = \frac{10 \text{ seg}}{5 \text{ mensajes}} = 2 \text{ seg/mensaje}$$

IV.2.3.4. Recepción de Mensajes Estadísticos de Tráfico

Los únicos nodos que podrían recibir mensajes estadísticos serían los semáforos inteligentes, utilizando la interfaz *eth2* la cual pertenece a la subred VANET. Esto ocurre porque en el proceso de envío de mensajes estadísticos de tráfico fue diseñado que la IP destino estuviese asociada con un semáforo inteligente que estuviera dentro de la VANET.

Este hecho permite asegurar que ningún nodo que no sea un semáforo inteligente podrá recibir mensajes estadísticos. Por ello, el proceso de recepción de este tipo de mensajes se diseñó teniendo en cuenta que sólo los SI podrían ejecutarlo. Los pasos del procedimiento son los siguientes:

- 1) Recepción Mensaje Estadístico: El semáforo inteligente recibe el mensaje estadístico y diferencia que tipo de estadística está tratando (densidad o retardo de tráfico).
- 2) Actualización Estadística: Una vez conocido que tipo de estadística se recibió en el mensaje, se actualiza la estadística correspondiente. Como este paso es muy extenso se subdividirá en sub pasos:
 - a. Una vez que el semáforo obtiene el valor estadístico instantáneo enviado por el vehículo, se debe chequear si existe alguna información o estadística previa (valor histórico) almacenado.
 - b. El SI actualiza y almacena la estadística mediante la utilización de una media exponencial ponderada (*Exponential Weight Mean Average*). Esta media consiste en un filtro paso bajo, el cual dependiendo en el valor de *alpha* utilizado ($\alpha \in [0,1]$), le otorga mayor peso al valor histórico (cuando tiende a cero) o al valor instantáneo (cuando tiende a uno). La ecuación de esta media exponencial ponderada se muestra a continuación, donde N_i representa el valor histórico de la estadística para el tiempo i :

$$EWMA: \bar{N}_i = \bar{N}_{i-1} * (1 - \alpha) + N_{inst} * \alpha \quad \alpha \in [0,1]$$

- c. El semáforo inteligente podría calcular la estadística utilizando diferentes valores de α almacenando los resultados. Uno de ellos podría ser utilizado para propósitos de estadística histórica mientras que el otro podría ser utilizado para consultar el tráfico en un momento instantáneo.
 - d. Una vez que los cálculos están hechos el semáforo inteligente almacena la información y espera recibir otro mensaje estadístico.
- 3) Difusión Estadística: El semáforo inteligente comparte periódicamente información sobre las estadísticas de tráfico de su área de cobertura con el resto de SI utilizando la interfaz *eth1* que pertenece a la subred de semáforos inteligentes.

El día ha sido dividido en cinco (5) períodos, debido a que las densidades de tráfico suelen ser variables a lo largo del día. Por lo tanto, cada semáforo inteligente realiza las actualizaciones de tráfico por períodos: $TDst_{6-9}$, $TDst_{9-12}$, $TDst_{12-15}$, $TDst_{15-18}$, $TDst_{18-21}$. Por ejemplo, $TDst_{6-9}$ reúne el promedio de densidad de tráfico de la ciudad, durante los días de la semana, desde 6:00 AM hasta las 9:00 AM. Este valor se actualizará continuamente utilizando la ecuación mostrada a continuación con un valor reducido de α para suavizar las desviaciones aisladas. Éste mismo cálculo se realizará para los demás períodos del día.

$$\overline{TDst}_{6-9,i} = \overline{TDst}_{6-9,i-1} * (1 - \alpha) + TDst_{6-9,i-1} * \alpha \quad \alpha \in [0,1]$$

IV.3. Fase III: Modificación y Configuración NCTUns

NCTUns es un software de código abierto que permite a los desarrolladores modificar el código con la finalidad de añadir nuevas funciones y capacidades al simulador. Por lo tanto, los usuarios pueden crear nuevas funciones y protocolos que el motor de simulación podría utilizar durante las simulaciones.

El objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado no es sólo simular una red VANET sino también la modificación del código fuente de NCTUns para añadir nuevas posibilidades que hagan que las simulaciones sean más realistas. Así, cuatro (4) módulos del simulador han sido modificados, tres (3) de ellos relacionados con el protocolo de enrutamiento AODV, y el último relacionado con el agente de movilidad *CarAgent*.

Con estas modificaciones el protocolo AODV es capaz de soportar, a partir de los nodos que ejecuten este protocolo, el cálculo y procesamiento de estadísticas de tráfico, tales como la densidad y el retardo de tráfico. Cada nodo que ejecute AODV será capaz de crear estadísticas de tráfico (vehículos) o procesarlas (semáforos inteligentes).

IV.3.1 Capacidades Añadidas a NCTUns

Con el objetivo de mejorar la calidad y obtener simulaciones más realistas con NCTUns, el código del simulador ha sido modificado. Por lo tanto, futuros usuarios del simulador podrían utilizar estas mejoras para obtener resultados más realistas en sus simulaciones de VANETs y HSVNs.

Las modificaciones al código de NCTUns se hicieron teniendo en cuenta el escenario que sería simulado, por lo que existen algunas líneas de código que funcionan exclusivamente para el marco de ciudad inteligente diseñado.

Como se mencionó anteriormente, la recolección de estadísticas de tráfico recae sobre todos los vehículos del escenario con AODV como protocolo de enrutamiento. Por el contrario, el procesamiento estadístico recae sobre los semáforos inteligentes, suponiendo que presentan capacidad computacional y memoria suficiente para almacenar dichos datos.

IV.3.1.1 Módulos Modificados NCTUns

Como se explicó en la Tabla 3, los mensajes *STAT_msg* incluyen diferentes tipos de información. Esta información se refiere a la densidad de tráfico de cada calle a lo largo del camino, el retardo de los vehículos al recorrer dichas calles y a las condiciones meteorológicas.

Así, en este proyecto esta información debe ser añadida cuando un mensaje es enviado. Además, el receptor de dicho mensaje debe ser capaz de comprender el tipo de información que recibe, por lo que el módulo encargado del patrón de movimiento del vehículo debe ser parte del proceso de recolección de estadísticas de tráfico.

Con el fin de no afectar el comportamiento del simulador, todo el código del simulador fue leído, entendido y analizado con el fin de tener buena información sobre dónde deberían ser agregadas las nuevas líneas de código. Cómo han sido modificados los diferentes módulos que forman parte del proceso y cómo los usuarios podrían hacer uso de ellos se detalla a continuación:

AODV.cc

El módulo original estaba a cargo de las tareas del protocolo de enrutamiento: creación de rutas, eliminar rutas obsoletas, mantener la lista de vecinos actualizada, envío periódico de mensajes HELLO, entre otras.

Al módulo modificado se le añadió un nuevo tipo de mensaje AODV (*AODV_STAT*). Además, a este módulo se le añadieron funciones que consistían en la contabilización de los vehículos vecinos (ejecutada por los vehículos) y actualización de estadística utilizando una media exponencial ponderada (ejecutada por los semáforos inteligentes).

Resumiendo los cambios introducidos en este módulo, se listan a continuación:

- Función *CheckNeiList_Stat* que se ejecuta cada dos segundos para la contabilización de los coches vecinos. Luego, el vehículo enviaría el valor al semáforo inteligente más cercano.
- Creación del mensaje estadístico *STAT_msg*.
- Proceso de actualización estadístico para los semáforos inteligentes. Este proceso consiste en calcular las estadísticas mediante la utilización de un filtro paso bajo (EWMA) y almacenar dichas estadísticas en archivos individuales que correspondan a cada semáforo inteligente, y en otro global para almacenar las estadísticas de la ciudad.
- Comentar cierta parte del código que prevenía el envío de mensajes HELLO cuando existían menos de dos saltos en la tabla de enrutamiento del nodo. Se realizó esta acción porque se necesitaba que los vehículos estuvieran continuamente conectados (mediante el envío de mensajes HELLO) entre sus vecinos y los semáforos inteligentes. De darse el caso en que el nodo presentara menos de dos saltos en su tabla de enrutamiento, los vehículos no enviarían mensajes HELLO, situación que se debe de evitar porque pone en riesgo el funcionamiento del sistema.
- Función para el ensamblaje de los mensajes *STAT_msg* y el envío al semáforo inteligente más cercano.

AODV.h

El archivo original contiene la declaración de todas las funciones, variables y constantes utilizadas en el módulo *AODV.cc* y *AODVrt.cc*. Los cambios introducidos en este módulo fueron simples: Añadir las declaraciones de las nuevas funciones, variables y constantes utilizadas dentro de los nuevos procesos desarrollados.

AODVrt.cc

El módulo original se creó para modificar y manipular las tablas y listas del protocolo de enrutamiento. La modificación añadida a este módulo fue una función que chequeaba la lista de vecinos, contabilizando el número de ellos con un tiempo de

expiración mayor al tiempo de consulta y a su vez obteniendo la dirección IP destino asociada con el semáforo inteligente más cercano. Los resultados de esta función se pasaban a la función encargada del ensamblaje y envío del mensaje estadístico.

CarAgent.cc

Este módulo de NCTUns está a cargo de la movilidad de los vehículos durante la simulación. Cada acción tomada por los vehículos es realizada por el agente de movilidad. El cambio realizado en este módulo consiste en que el vehículo avise al semáforo inteligente más cercano sobre cuándo está en el proceso de toma de decisión de giro. El SI estaría encargado del proceso de cálculo de estadística (obtención del retardo). Para establecer cuál es el semáforo inteligente más cercano se utiliza la misma lógica que se utilizó en las estadísticas de densidad de tráfico.

IV.3.1.2. Ficheros Creados en NCTUns

En este trabajo diversos módulos del simulador de redes han sido modificados, y con estas modificaciones diferentes archivos de salida fueron creados. Los archivos creados y la información contenida en ellos serán detallados en la siguiente sección:

Fichero *Traffic-Stat-ID*

Cada uno de los semáforos inteligentes genera este tipo de archivo para almacenar y actualizar las estadísticas de densidad de tráfico de su área de cobertura. El SI recibe información cada dos segundos, como se demostró anteriormente. Además de estos ficheros individuales se crea un fichero global donde se almacenan las estadísticas de toda la ciudad. El contenido de estos ficheros está organizado en columnas: la primera de ellas contiene el tiempo de simulación en el cual el mensaje fue recibido y en la segunda columna la estadística actualizada para ese tiempo determinado mediante el uso de la media exponencial ponderada (EWMA).

Fichero *Global-Traffic-Stat*

Este archivo es generado por el simulador para almacenar en un único archivo la información sobre la densidad de tráfico de todos los semáforos inteligentes de la simulación. La razón de la creación de este fichero es la de filtrar los resultados obteniendo sólo la última estadística de cada segundo de cada semáforo inteligente mediante la utilización de un filtro AWK. El contenido de este archivo también está organizado por columnas: la primera de ellas muestra el tiempo en que el mensaje fue recibido, la segunda muestra el identificador del semáforo inteligente que recibió el mensaje, la tercera muestra la estadística que tiene el SI en dicho momento de simulación y la cuarta columna muestra el número de vecinos recibidos en el último mensaje estadístico.

Fichero *Delay-Stat-ID*

Cada uno de los semáforos inteligentes genera este tipo de archivo para almacenar y actualizar las estadísticas de retardo de tráfico de su área de cobertura. Cuando un SI recibe un mensaje estadístico con información de retardo, este debe verificar cual fue la última información recibida de dicho vehículo. Esta verificación se realiza en un archivo individual que cada vehículo tiene, para hacer un seguimiento del momento en que toma una decisión de giro. El contenido de este fichero está organizado en columnas: la primera de ellas muestra el tiempo en que el SI recibe el mensaje estadístico, la segunda muestra el vehículo que envía dicho mensaje y la tercera muestra el cálculo de retardo obtenido a partir de la sustracción de tiempos consecutivos de un mismo vehículo.

Fichero *Global-Delay-Stat*

Este archivo es generado por el simulador para almacenar en un único archivo la información sobre el retardo de tráfico de todos los semáforos inteligentes de la simulación. La razón de la creación de este fichero es la de filtrar los resultados mediante la utilización de un filtro AWK. El contenido de este fichero se organizado

en columnas: la primera de ellas muestra el momento en que se recibe el mensaje estadístico, la segunda muestra el semáforo inteligente que recibe dicho mensaje, la tercera muestra el identificador del vehículo que envió el mensaje y la cuarta y última columna muestra la estadística que presente el SI en dicho momento.

Fichero *Delay-Car-ID*

Cada uno de los vehículos genera este archivo para llevar el control de cada momento en que dicho coche realiza una toma de decisión de giro. Este fichero es importante para la simulación ya que, cada vez que un semáforo inteligente realiza el cálculo de un retardo de cierto vehículo, dicho SI debe comprobar el fichero individual del coche. El contenido de este fichero es simple y consiste en una única columna que muestra los tiempos asociados a las tomas de decisión de giro del vehículo.

IV.3.2. Escenario y Ambiente de Simulación

El escenario elegido para las simulaciones y pruebas de la ciudad inteligente es un mapa al estilo de Manhattan con calles que conforman bloques de 4X4. La ciudad tiene obstáculos en cada cuadra los cuales representan edificios y semáforos en todas las intersecciones los cuales gestionan el tráfico. Sólo hay algunos semáforos inteligentes entre los semáforos regulares, con la idea de dar cobertura varias calles con tan sólo un semáforo inteligente, tomando ventaja del diagrama de propagación omnidireccional de su antena. En este caso, un semáforo inteligente recibe información de cualquier vehículo que se encuentre en cualquiera de las cuatro (4) calles a las que le brinda cobertura. Siguiendo este diseño no es necesaria la implementación de SI en cada intersección, por lo que se puede ahorrar en recursos en el momento de implementar el proyecto.

Los semáforos inteligentes se representan mediante nodos móviles multi-interfaz, con dos interfaces configuradas en modo Ad-Hoc configuradas en dos

subredes diferentes. Los vehículos fueron representados utilizando *ITS Cars* equipados con una interfaz 802.11b en modo Ad-Hoc.

IV.3.2.1. Descripción de Simulación

La simulación consiste en un número determinado de vehículos (N) los cuales se desplazan alrededor de la ciudad estableciendo comunicaciones con los semáforos inteligentes más cercanos y con otros vehículos. Los coches enviarán a los SI más cercanos datos sobre la cantidad de vecinos, cada dos segundos, y el retardo de tráfico. Cada vez que un semáforo inteligente recibe datos de un vehículo se calcula y actualiza la estadística de la densidad de coches y el retardo de tráfico en su área de cobertura, lo guardo en un fichero individual así como también en un global.

Los resultados esperados con estas simulaciones son cálculos en tiempo real, por parte de cada semáforo inteligente, de las estadísticas de densidad y retardo de tráfico del área a la que se le da cobertura. Es esencial que las estadísticas resultantes se adapten a las situaciones del escenario simulado, ya que de esta forma se estaría comprobando la fiabilidad del sistema aplicado en una ciudad inteligente en un ambiente real.

IV.3.2.2. Escenario Simulado

El escenario simulado consiste en una ciudad inteligente con una cierta cantidad de vehículos que circulan alrededor de ella. En un momento determinado (t_1) el número de vehículos dentro de la ciudad aumentará, debido a la llegada de un grupo de vehículos por la entrada de la ciudad ubicada al sur de la misma. A partir de un segundo momento (t_2) se volverá a incrementar el número de vehículos dentro de la ciudad por medio de un segundo grupo de vehículos que realiza su entrada a la ciudad. Estos aumentos en la cantidad de vehículos dentro de la ciudad representan

las horas punta de cualquier ciudad lo que se traduce en un aumento de la densidad y retardo de tráfico. Al simular un día en una ciudad, también debe haber un retorno a una situación inicial, el cual sería el regreso de los conductores a sus casas, de modo que también es simulada la salida de los vehículos de la ciudad. La reducción de coches se realiza en los tiempos (t_3) y (t_4) en los cuales se configuran a los grupos de vehículos que realizaron su entrada anteriormente a que salgan de la ciudad. La Tabla 5 muestra como la cantidad de vehículos dentro de la ciudad aumenta y disminuye a lo largo del tiempo de simulación.

Tabla 5. Número Vehículos vs Tiempo Simulación.

Rango Tiempo Simulación	Número Vehículos
0 – 40 sec	30
41 – 100 sec	42
101 – 250 sec	56
251 – 300 sec	44
301 – 400 sec	30

Fuente: Autoría Propia.

En la Figura 12 se muestra la localización de la entrada de la ciudad, además de mostrar un posible escenario de simulación. Los coches en esta figura son representados con Ferrari rojos y los SI con semáforos. En este escenario tres semáforos inteligentes serán estudiados con detenimiento para entender el comportamiento y la adaptabilidad del código implementado dentro del simulador. Estos semáforos serían ITL_{59} , ITL_{44} e ITL_{29} , ubicados en la entrada de la ciudad, en el centro de la ciudad y en las afueras de la ciudad, respectivamente. Estos SI representarán todas las posibles situaciones que podrían ocurrir en el escenario, así que el código será puesto a prueba bajo diferentes circunstancias dentro de la misma ciudad. Se espera que el código se adapte de forma rápida y eficiente a las situaciones planteadas.

En la Figura 13 se muestra el escenario real simulador en NCTUns para la obtención de los resultados deseados. Una autopista está conectada a la entrada de la ciudad, al sur de la misma, con dos grupos de vehículos esperando para realizar su entrada a la ciudad. El primer grupo de ellos se activa en el segundo 40 (t_1) comenzando su movimiento hacia la entrada de la ciudad. El segundo grupo hace lo mismo a partir del segundo 100 (t_2). Para la simulación de la retirada de los vehículos, se configuraron los mismos grupos de vehículos anteriores como dañados por lo que dejan de formar parte de la simulación. El primer grupo se daña en el segundo 250 (t_3) mientras que el segundo grupo lo hace en el segundo 300 (t_4).

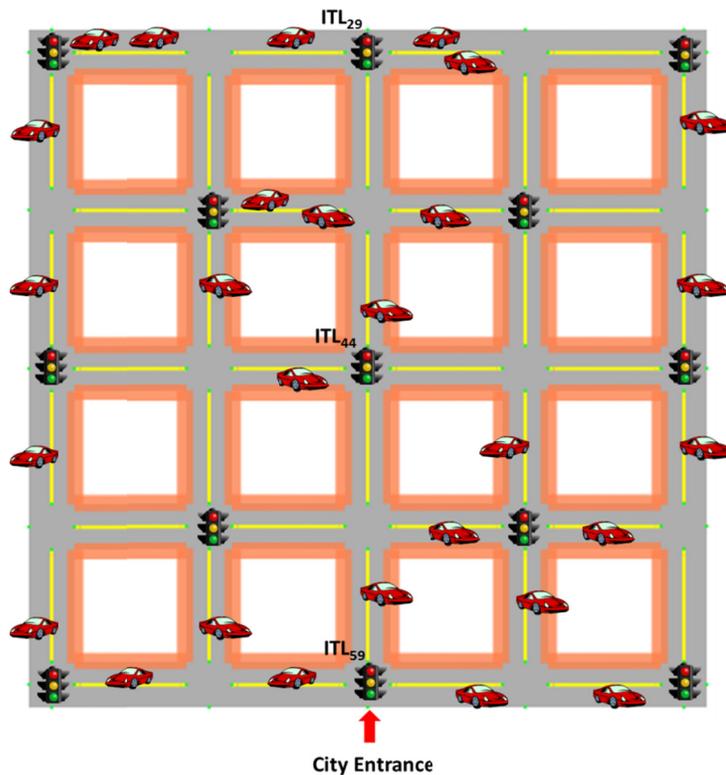


Figura 12. Representación Escenario Simulado.

Fuente: Autoría Propia.

En el simulador NCTUns, una vez que un vehículo se rompe, vuelve a su posición inicial y permanece allí hasta el final de la simulación. Es decir, los

vehículos saldrían de la ciudad (por la tarde) y retornan a la autopista por medio de la cual ingresaron a la ciudad en la mañana.

Finalmente, en la Tabla 6 se muestran todos los parámetros de simulación que fueron utilizados para la obtención de los resultados que se mostrarán en el siguiente capítulo.

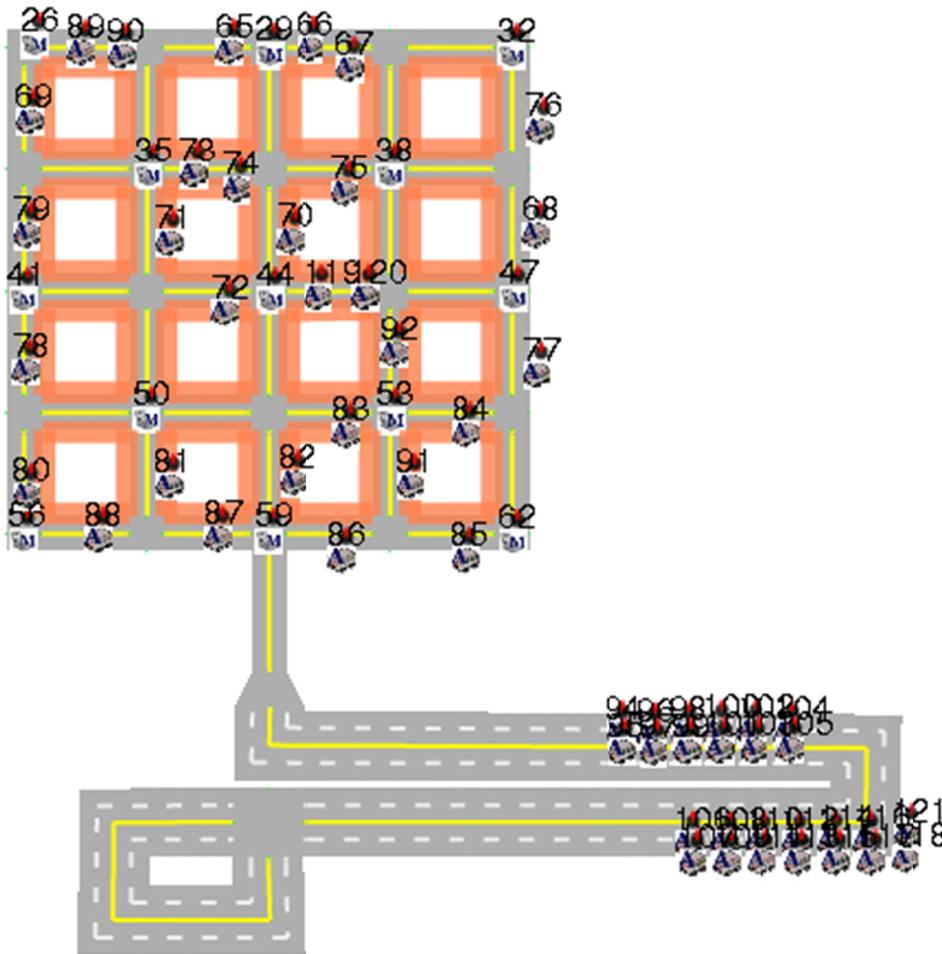


Figura 13. Escenario Real Simulado.

Fuente: Autoría Propia.

Tabla 6. Configuración de Simulación.

Configuración Simulación	
Capacidad Media	11 Mbps
Tamaño Paquete	256 Kbytes
Rango de Tranmisión	ITL Interfaz eth1: 300 m
	ITL Interfaz eth2: 130 m
	Vehículos: 130 m
<i>Carrier Sense</i>	300 m: -68.5865 dBm
	130 m: -61.3229 dBm
Tiempo Simulación	400 sec
Especificación MAC	802.11b
Área	500x500
Velocidad Promedio	10 m/sec
Número Nodos	ITLs: 13
	Vehículos: 56
Modelo Movilidad	CarAgent* (NCTUns)
Protocolo Enrutamiento	AODV*

*: Modificado en este Trabajo Especial de Grado

Fuente: Autoría Propia.

IV.4. Fase IV: Prueba de Funcionamiento

Ya modificado y configurado el simulador de redes se procedió a la prueba de funcionamiento del sistema de recolección y procesado estadístico mediante la simulación de un entorno controlado en el cuál se conocía previamente cómo debería ser el comportamiento del sistema en dicha situación.

Al encontrarse algún tipo de malfuncionamiento o alguna situación que no estuviera considerada en la fase de diseño del sistema, se procedió a la adición de dichas mejoras en el código y a volver a la fase de prueba de funcionamiento.

Se repitió el paso anterior las veces que fueran necesarias hasta observar que el comportamiento del sistema estadístico se asemejaba al comportamiento teórico esperado por el grupo de investigación, tomando en cuenta también la estabilidad del simulador durante las ejecuciones de simulación.

Capítulo V

Resultados

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos correspondientes a cada objetivo específico planteado, los cuales en conjunto, completan el desarrollo del Sistema de Recolección y Cálculo de Estadísticas de Tráfico.

El escenario descrito en el Capítulo IV se ha simulado utilizando el simulador de redes NCTUns, presentándose los resultados de dichas simulaciones en esta sección. El objetivo de estas simulaciones es la prueba y evaluación de cómo el uso de Sistemas de Transporte Inteligente pueden ayudar a la mejora de la seguridad vial.

Por otro lado, dichas simulaciones también han de probar y evaluar los cambios introducidos en el simulador durante la realización de este Trabajo Especial de Grado. Además se demostrará que es posible la obtención de estadísticas certeras en tiempo real sobre la densidad del tráfico y su retardo.

Todas las gráficas presentadas a continuación que indiquen un Intervalo de Confianza (IC) han sido obtenidas a partir de la repetición del escenario de simulación diez (10) veces y representadas utilizando un Intervalo de Confianza del 90%.

V.1. Resultados ITL₅₉ (Entrada Ciudad Inteligente)

Como se explicó anteriormente, uno de los tres semáforos inteligentes que serán estudiados a fondo será el ITL₅₉ (*Intelligent Traffic Light #59*). La ubicación de dicho semáforo inteligente está en la entrada de la ciudad, al sur de la misma, por lo que existirá un cuello de botella de vehículos a la espera de realizar su entrada a la

ciudad. Esto se traducirá en un aumento de la densidad y el retardo de tráfico para dicha área en específico. Primero, se analizarán los resultados referidos a estadísticas de densidad de tráfico para luego analizar aquellos que se relacionen con las estadísticas de retardo de tráfico.

V.1.1. ITL₅₉ Resultados Densidad de Tráfico

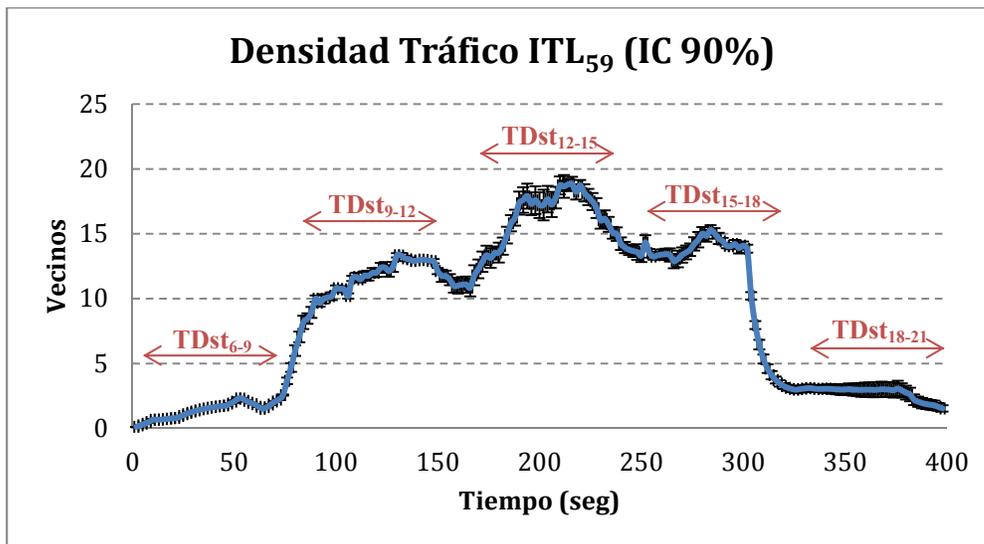


Figura 14. Resultados Densidad de Tráfico ITL₅₉ IC 90%.

Fuente: Autoría Propia.

Teniendo en cuenta la Figura 13, se puede observar que en un primer momento el semáforo ITL₅₉ solo tiene tres (3) vehículos alrededor por lo que las estadísticas del semáforo deben ser bajas para los primeros segundos de la simulación. Además, recordando la Tabla 4 se sabe que el primer grupo de vehículos que entra a la ciudad desde la autopista inicia su movimiento a partir del segundo 40, aunque están distanciados de la entrada por lo que deben invertir tiempo recorriendo la autopista. La entrada real del primer grupo de vehículos se evidencia en la Figura 14 alrededor del segundo 75, siendo un resultado lógico.

El gráfico presenta un comportamiento similar al descrito en la Tabla 4: Existen cinco (5) zonas delimitadas las cuales pueden ser asociadas con la entrada y salida de los grupos de vehículos ubicados en la autopista. La primera área es la condición inicial (0 – 75 segundos), en la que sólo 30 vehículos transitan por la ciudad distribuidos uniformemente a través de ella, habiendo tan sólo tres de ellos alrededor del ITL_{59} en los comienzos de la simulación. En la segunda zona (75 – 170 segundos) se muestra un aumento en la densidad de vehículos en el área de cobertura del ITL_{59} , ya que el primer grupo de los vehículos que entrarán a la ciudad han llegado a la entrada de la misma. La tercera zona (170 – 250 segundos) muestra cuando el segundo grupo de vehículos que entrará a la ciudad ya se encuentran en la entrada de la misma, pero al haber vehículos del primer grupo aun intentando realizar su entrada por lo que ambos grupos se mezclan aumentando otra vez la densidad de vehículos en el área y alcanzando el valor máximo de la simulación. La cuarta zona (250 – 300 segundos) muestra cómo disminuye la densidad de vehículos en la zona, debido a la configuración como rotos del primer grupo de vehículos que realizó la entrada a la ciudad, aunque los vehículos del segundo grupo aun estén circulando por la ciudad. La quinta y última zona (300 – 400 segundos) muestra el momento en que los vehículos del segundo grupo de la autopista son configurados como rotos (simulando su salida de la ciudad), quedando la ciudad sólo con los 30 coches iniciales uniformemente distribuidos, haciendo que la densidad de vehículos baje nuevamente.

La simulación tiene una duración total de 400 segundos, y cuyo objetivo es la de simular un día en una ciudad como Barcelona desde las 6:00 AM hasta las 21:00 PM, rango temporal en donde es más importante el estudio de las estadísticas propuestas en este Trabajo Especial de Grado. Estos intervalos temporales están representados en la Figura 14.

V.1.2. ITL₅₉ Resultados Retardo de Tráfico

Una vez analizados los resultados estadísticos de densidad de tráfico, se analizarán y explicarán los resultados referentes a las estadísticas de retardo de tráfico del semáforo inteligente 59. Los resultados de retardo deben estar íntimamente relacionados con los resultados de densidad de tráfico, ya que fueron obtenidos a partir de la misma simulación. Por retardo, se refiere a la demora promedio que tarda un vehículo en recorrer una calle, entre intersecciones consecutivas.

Es importante resaltar que el tiempo de retardo mínimo esperado en los resultados es de 10 segundos, debido a que los vehículos se trasladan en el peor de los casos a 10 m/seg y la longitud de las calles es de 100 metros. Asumiendo el peor de los casos, el vehículo recorrerá la calle completa a velocidad máxima, necesitando de tan solo 10 segundos para hacerlo. A partir de esta premisa, cualquier retardo menor a 10 segundos será considerado como data insignificante para el sistema.

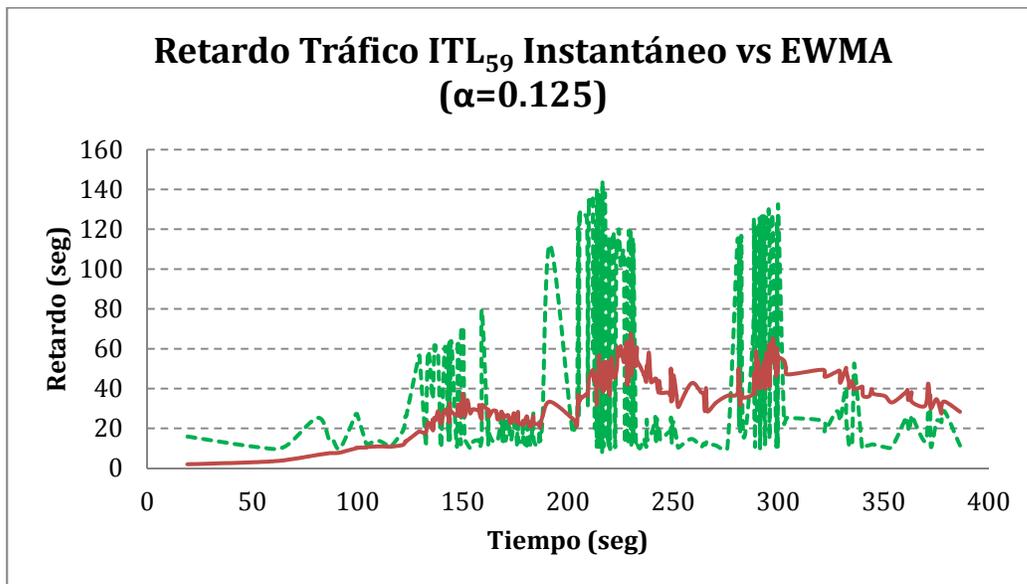


Figura 15. Resultados Retardo de Tráfico ITL₅₉.

Fuente: Autoría Propia.

En las siguientes figuras, Figura 15 y Figura 16, se muestra como las estadísticas de retardo de tráfico del semáforo inteligente 59 se adaptan a los cambios en el escenario. En la Figura 15 la media exponencial ponderada está configurada con un valor de α de 0.125, mientras que en la Figura 16 el valor de α se configuró en 0.250. En ambas figuras se muestra en color verde el retraso instantáneo calculado por el ITL_{59} y en rojo la estadística histórica del mismo.

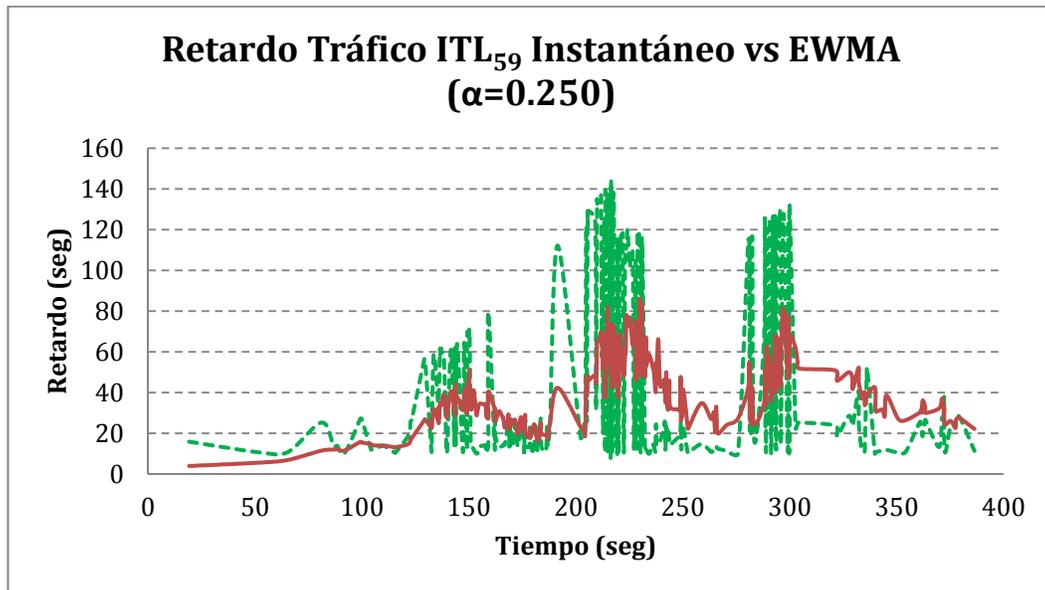


Figura 16. Resultados Retardo de Tráfico ITL_{59} .

Fuente: Autoría Propia.

En ambas figuras se puede apreciar que el retardo instantáneo coincide con el comportamiento de la gráfica de densidad de tráfico, ya que también presentan cinco (5) áreas delimitadas. La segunda (125 – 160 segundos) y tercera (180 – 230 segundos) área corresponden, respectivamente, a la entrada del primer y segundo grupo de vehículos a la ciudad, justificando el aumento del retardo del tráfico en el área de cobertura. Como se explicó para los resultados de densidad de tráfico, cuando el primer grupo de vehículos llega a la entrada de la ciudad los coches deben esperar su turno para realizar la entrada, razón por la cual aumenta el retardo. Cuando el segundo grupo de vehículos llega a la entrada, no todos los vehículos del primer

grupo han logrado entrar por lo que juntos conforman un grupo más grande lo que hace que también aumente el retardo, alcanzando un valor máximo. Luego, en la cuarta área (275 – 310 segundos) el retardo disminuye aunque sigue siendo considerablemente elevado. Esta situación es debido a la configuración del primer grupo de vehículos de la autopista como rotos (simulan su salida de la ciudad), aunque los vehículos del segundo grupo aun intentan realizar su entrada a la ciudad. Finalmente, luego de que el segundo grupo de vehículos de la autopista se configura como estropeados el retardo vuelve a su valor inicial.

Como último análisis de estas dos figuras se puede apreciar que cuando el semáforo inteligente 59 calcula los valores estadísticos utilizando un valor de *alpha* de 0.25 la estadística reacciona y se adapta rápidamente a los cambios que ocurren en el escenario, mientras que cuando se usa un valor de 0.125 lo hace más lentamente. Matemáticamente, esto puede ser explicado ya que el valor de *alpha* determina el peso que los valores históricos e instantáneos tendrán en la ecuación. Cuando *alpha* se establece con un valor bajo, cercano a cero, al valor histórico se le otorga mayor peso, mientras que cuando se establece con un valor alto, cercano a uno, se le otorga mayor peso al valor instantáneo. Como 0.25 es mayor que 0.125 es lógico asumir que las estadísticas reaccionarán más rápido a las variaciones instantáneas, como de hecho sucede.

La Figura 17 muestra las estadísticas de retardo de tráfico del semáforo inteligente 59 utilizando un valor de *alpha* de 0.125 con un Intervalo de Confianza del 90%. En este gráfico se pueden apreciar los valores máximos de retardo alcanzados por las estadísticas. El valor máximo de retardo es de alrededor 70 segundos y se obtiene en la zona que corresponde a la tercera área (200 – 250 segundos), cuando los dos grupos de vehículos entrantes coinciden en la entrada de la ciudad.

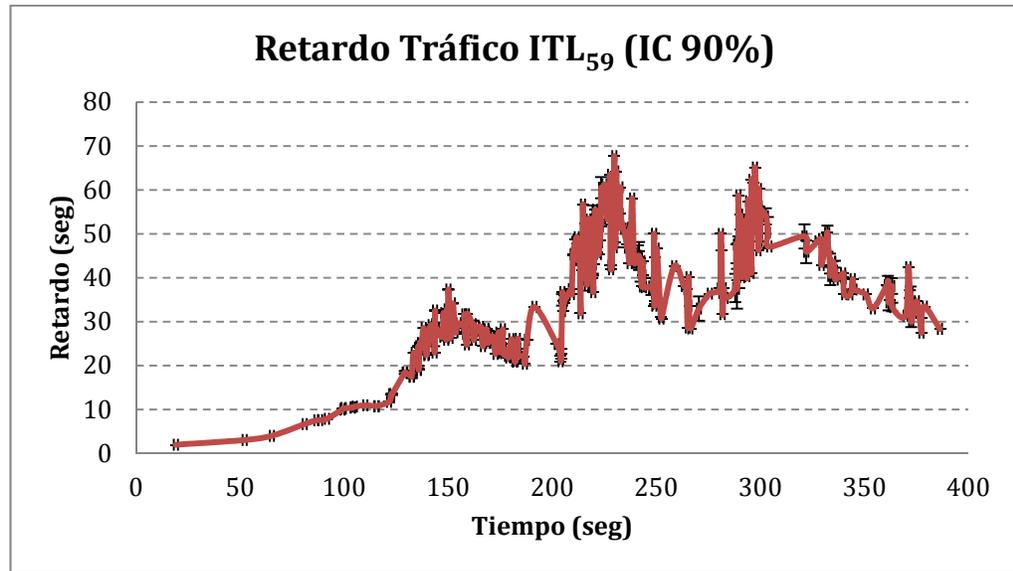


Figura 17. Resultados Retardo de Tráfico ITL₅₉ IC 90%.

Fuente: Autoría Propia.

V.2. Resultados ITL₄₄ (Centro de la Ciudad)

El ITL₄₄ está ubicado en el centro de la ciudad. Esto podría representar una densidad de vehículos constante debido a una mayor probabilidad de que los coches pasen por esta área en cualquier momento del día. En otras palabras, un vehículo puede llegar al centro de la ciudad desde cualquier parte de la misma (norte, sur, este u oeste), por lo que es más probable que un coche viaje a través del centro que por las afueras de la ciudad.

V.2.1. ITL₄₄ Resultados Densidad de Tráfico

En la Figura 18 se muestra cómo la estadística de densidad de tráfico del semáforo inteligente 44 evoluciona a lo largo del tiempo de simulación. Recordando la Figura 13, se puede observar que inicialmente el ITL₄₄ está rodeado por dos vehículos, por lo que las estadísticas del semáforo en los primeros segundos de

simulación deben tender a dicho valor hasta que los coches salgan del área de cobertura. En la primera etapa de la simulación se observa como las estadísticas tienden a un valor cercano a dos (2) vecinos, pero cuando los coches salen del área de cobertura las estadísticas vuelven a decrecer.

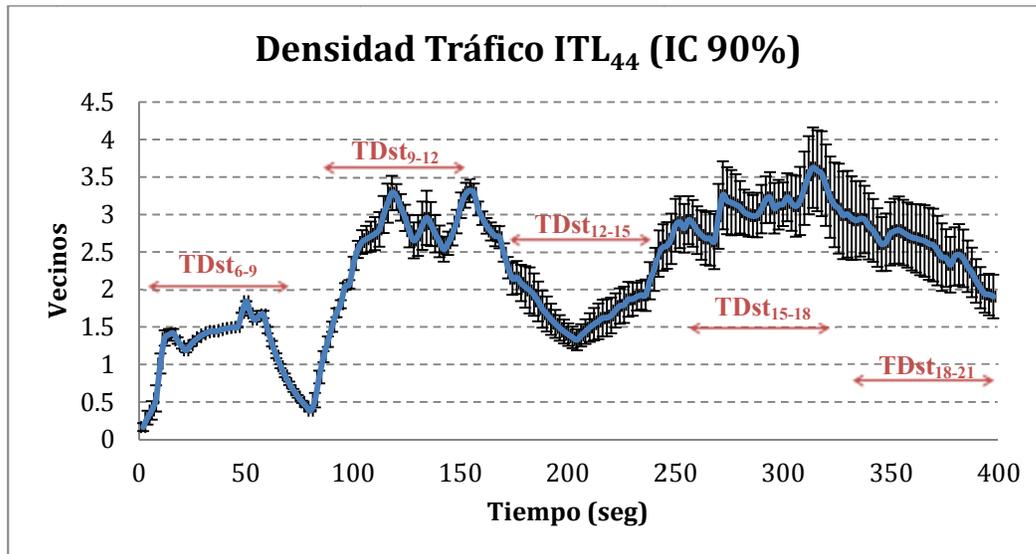


Figura 18. Resultados Densidad de Tráfico ITL₄₄ IC 90%.

Fuente: Autoría Propia.

A diferencia de los resultados de densidad de tráfico del ITL₅₉, la Figura 18 no presenta cinco (5) áreas fuertemente delimitadas para el análisis, sino que presenta lo que podría ser considerado como tres (3) áreas diferenciadas. La primera de ellas (0 – 80 segundos) representa el período de tiempo en el cual el centro de la ciudad no se ve afectada por la entrada del primer grupo de vehículos a la ciudad. Si chequeamos los resultados del ITL₅₉ a partir del segundo 75 es que los coches del primer grupo comienzan a entrar en la ciudad, por lo que es razonable esperar que estos vehículos se trasladen por el centro de la ciudad algunos segundos más tarde. De hecho es lo que se obtiene como resultado: la densidad de tráfico del semáforo inteligente 44 aumenta considerablemente a partir del segundo 80 de simulación.

A partir del segundo 200 de simulación se evidencia la contribución del segundo grupo de vehículos que entra a la ciudad, manteniendo un valor estable de las estadísticas de densidad de tráfico. Para resaltar la diferencia entre un semáforo inteligente implementado en el centro de la ciudad y otro implementado en las afueras de la misma, se compararán los valores promedio de densidad de tráfico, para lo cual se presenta la Tabla 7.

Tabla 7. Promedio Densidad Tráfico ITL₄₄.

Valor Promedio Densidad Tráfico ITL₄₄	
Simulación Completa	2.24696
Desde Segundo 80	2.50639

Fuente: Autoría Propia.

Como se muestra en la tabla anterior, el valor promedio de la densidad de tráfico que presenta el ITL₄₄ es mayor cuando sólo se considera el tiempo de simulación en el cual los grupos de vehículos ingresan a la ciudad en vez del tiempo completo de simulación.

También se puede observar en la Figura 18 que desde el inicio de la segunda zona existe un comportamiento pseudo estable: aunque los dos grupos de vehículos que ingresaron a la ciudad ya hayan salido a partir del segundo 300, la densidad de tráfico del ITL₄₄ se mantiene estable. Como se mencionó anteriormente, los vehículos que se encontraban inicialmente dentro de la ciudad tenderían a desplazarse hacia el centro de la ciudad en vez de las afueras (de acuerdo con el escenario de simulación), por lo que al final de la simulación es más probable que exista mayor número de vehículos en el centro de la ciudad que en las afueras.

V.2.2. ITL₄₄ Resultados Retardo de Tráfico

Si se esperaba un resultado estable de densidad de tráfico para el ITL₄₄ sería lógico esperar resultados de retardo de tráfico constantes. Lo más importante del análisis de los resultados estadísticos de tráfico referente al retardo, obtenidos a partir de las simulaciones, es que sean consistentes con los resultados de densidad de tráfico obtenidos anteriormente.

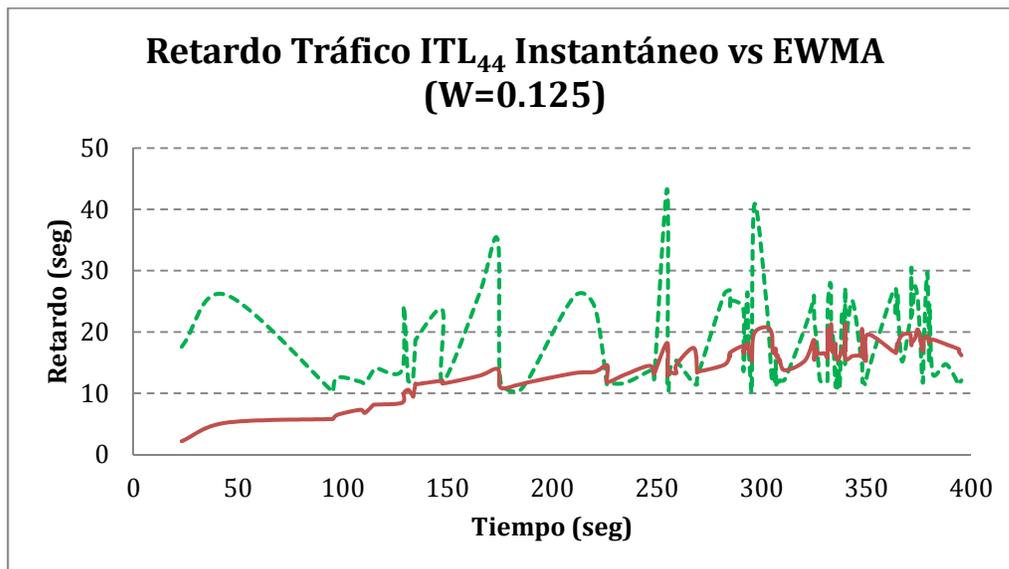


Figura 19. Resultados Retardo de Tráfico ITL₄₄.

Fuente: Autoría Propia.

Una vez más la Figura 19 y Figura 20 compararán la adaptación del semáforo inteligente, en este caso el 44 ubicado en el centro de la ciudad, a los cambios que se producen en el escenario. En la Figura 19 se obtienen los resultados estadísticos de retardo de tráfico utilizando un valor de *alpha* de 0.125, mientras que en la Figura 20 se utiliza un valor de 0.25.

En ambos gráficos se puede observar cómo las estadísticas de retardo de tráfico cambian de acuerdo a la variación que se produce en los resultados de densidad de tráfico. Con cada incremento en la estadística de densidad de tráfico se

puede ver un cambio similar en la estadística de retardo de tráfico, lo que confirma que el retardo y la densidad de tráfico están íntimamente relacionados.

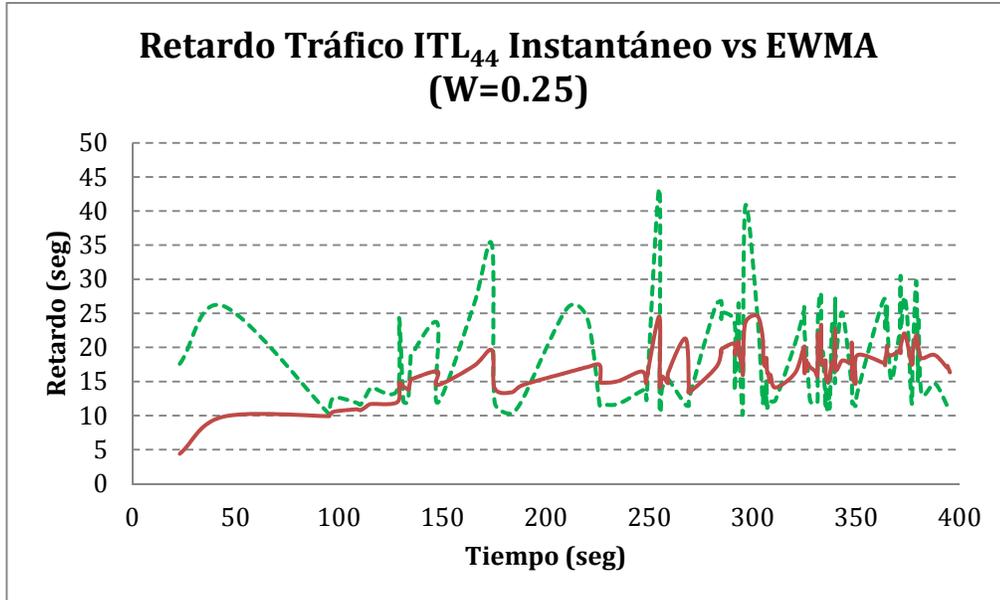


Figura 20. Resultados Retardo de Tráfico ITL₄₄.

Fuente: Autoría Propia.

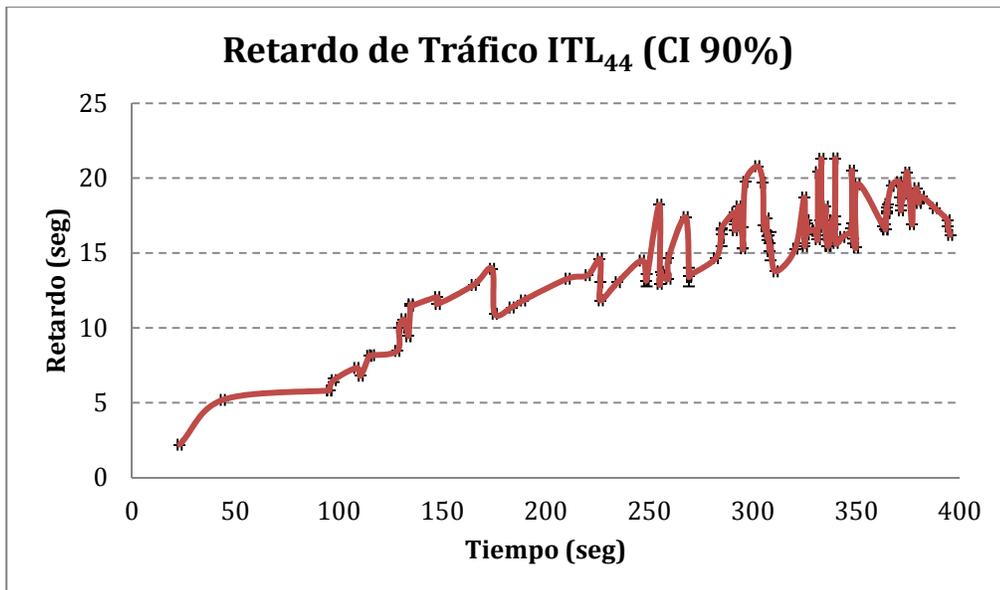


Figura 21. Resultados Retardo de Tráfico ITL₄₄ IC 90%.

Fuente: Autoría Propia.

La Figura 21 muestra las estadísticas de retardo de tráfico del semáforo inteligente 44 calculadas con un valor de α de 0.125 y utilizando un Intervalo de Confianza del 90%. En este gráfico se pudo apreciar los valores máximos a los que puede llegar el retardo de tráfico durante la simulación, el cual llega a un máximo de 22 segundos valor que corresponde a la tercera área del gráfico.

V.3. Resultados ITL₂₉ (Afueras de la Ciudad)

El último de los tres semáforos inteligentes que serán estudiados en este Trabajo Especial de Grado es el ITL₂₉ el cual se encuentra ubicado al norte de la ciudad, en lo que se considera como las afueras de la misma. Como se explicó anteriormente, en una ciudad tradicional es más probable que los vehículos viajen hacia el centro de la ciudad que hacia las afueras, ya que como lo indica su nombre las afueras de la ciudad hacen referencia a sitios remotos lo que se traduce en menor población, peatones y vehículos.

Los resultados que se esperan para este semáforo inteligente es un registro bajo de estadísticas de densidad y retardo de tráfico, a pesar de que sean posible situaciones esporádicas caracterizadas por un aumento puntual de las estadísticas de tráfico.

V.3.1. ITL₂₉ Resultados Densidad de Tráfico

En la Figura 22 se muestra cómo la estadística de densidad de tráfico del semáforo inteligente 29 evoluciona a través del tiempo de simulación. Refiriéndose a la Figura 13, se puede observar que en un primer momento el ITL₂₉ tiene tres (3) vehículos en su área de cobertura, por lo que la estadística en los primeros segundos de simulación deberá tender a dicho valor. En los primeros momentos de la simulación se evidencia cómo las estadísticas tienden a un valor cercano a 2 vecinos,

pero luego dichos vehículos salen del área de cobertura por lo que las estadísticas decaen nuevamente. A partir de dicho momento en adelante, las estadísticas del ITL_{29} dependerán directamente de los vehículos que se desplacen a través de su área de cobertura.

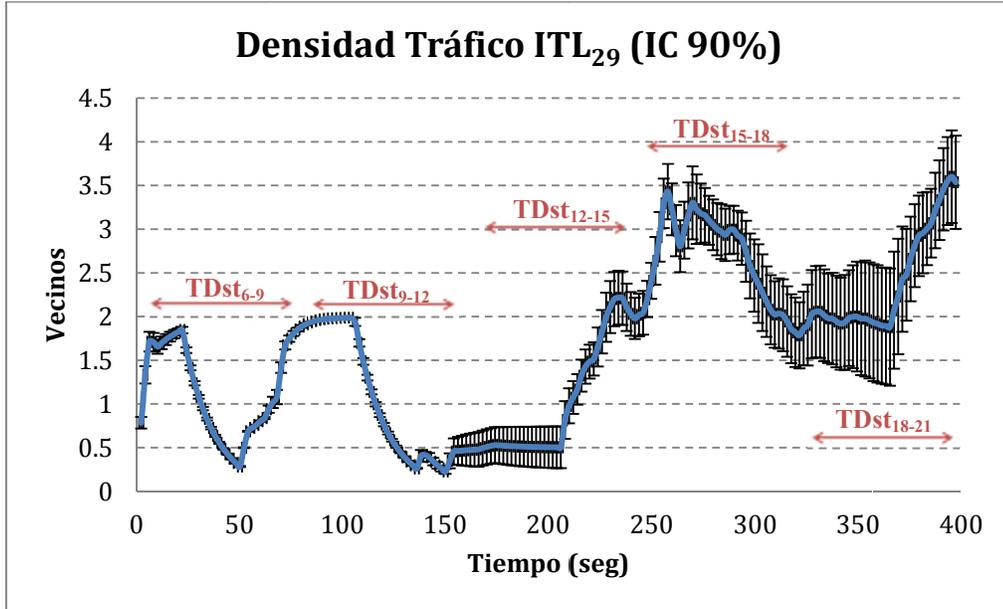


Figura 22. Resultados Densidad de Tráfico ITL_{29} IC 90%.

Fuente: Autoría Propia.

Este gráfico tiene una relación directa con los resultados obtenidos a partir del ITL_{44} debido a la proximidad geográfica entre ambos semáforos inteligentes. Para ello, la comparación entre los resultados se realizará tomando en cuenta el semáforo inteligente 44 en vez del semáforo 59, que es donde realmente sucede el cuello de botella durante el ingreso de los dos grupos de vehículos a la ciudad.

Como se muestra en la Figura 22, el aumento en la densidad de tráfico más importante inicia a partir del segundo 200 de la simulación. Consultando la Tabla 5, este aumento coincide con el momento en que los dos grupos de vehículos ya están realizando el ingreso a la ciudad. Un aspecto relevante es que el aumento de la

densidad de coches se produce cerca de 120 segundos después de que el primer grupo de vehículos son registrados en las estadísticas del semáforo inteligente 44. Este hecho puede justificarse sobre la base que los vehículos invierten tiempo trasladándose desde el centro de la ciudad hasta el área de cobertura del ITL₂₉.

A pesar de que en este semáforo inteligente no se esperaba un registro estadístico considerable al estar implementado en las afueras de la ciudad, se observa que su comportamiento estadístico es muy similar al ITL₄₄ en términos de resultados, aunque con un retraso de tiempo. Esto conlleva a pensar que, si bien el ITL₂₉ fue pensado inicialmente como un semáforo ubicado en las afueras de la ciudad, este se comporta realmente como un semáforo ubicado en las adyacencias del centro de la ciudad. La lejanía del semáforo inteligente no es suficiente para que su comportamiento fuera como el esperado inicialmente en la fase de diseño.

Tabla 8. Promedio Densidad Tráfico ITL₂₉.

Valor Promedio Densidad Tráfico ITL₂₉	
Simulación Completa	1.641119
A Partir Segundo 200	2.285358

Fuente: Autoría Propia.

Comparando la Tabla 8 y la Tabla 7 se pudo apreciar que cuando se calcula el valor promedio para el momento en que los vehículos que entran a la ciudad son parte de la estadística de los semáforos ITL₄₄ e ITL₂₉ son prácticamente iguales. Esto corrobora la idea de que ambos semáforos inteligentes tienen un comportamiento muy similar.

Aunque el ITL₂₉ no se comporta como se esperaba en un principio y que no pudieron ser analizados los tres tipos de comportamientos planteados en la fase de diseño de la ciudad inteligente, se ha podido comprobar el funcionamiento general del código modificado del simulador de redes.

V.3.2. ITL₂₉ Resultados Retardo de Tráfico

Una vez demostrado que el comportamiento de la densidad de tráfico del semáforo ITL₂₉ en realidad es similar al del semáforo ITL₄₄, se espera que los resultados de retardo de tráfico de ambos semáforos sean similares.

Como en análisis anteriores, en la Figura 23 y la Figura 24 se muestra la adaptación de las estadísticas de tráfico del semáforo inteligente 29 a las condiciones que del escenario, mediante la utilización de una media exponencial ponderada con diferentes valores de α , 0.125 y 0.25 respectivamente.

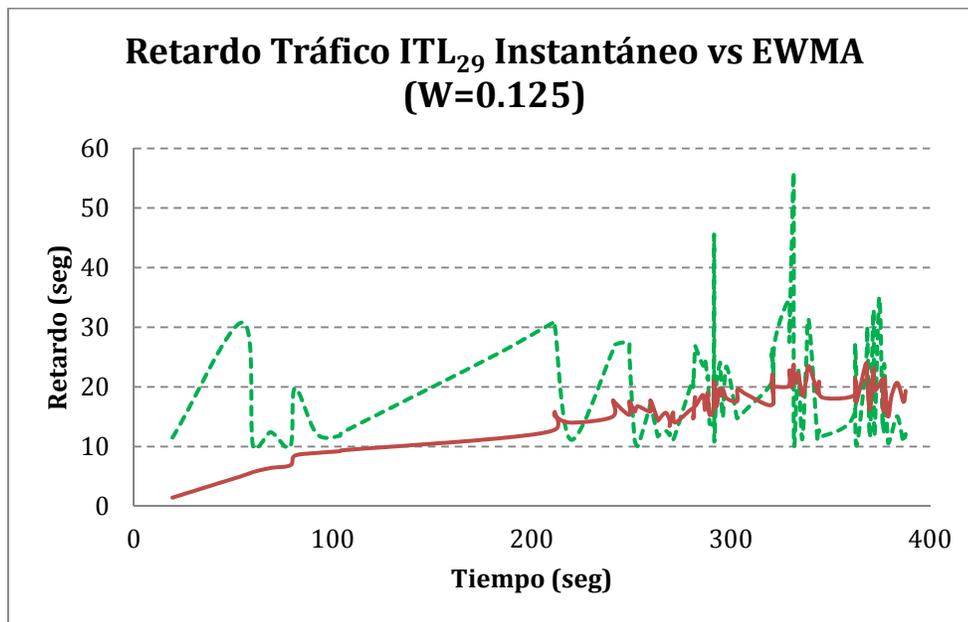


Figura 23. Resultados Retardo de Tráfico ITL₂₉.

Fuente: Autoría Propia.

En ambos gráficos se puede apreciar que el retardo de tráfico incrementa en los mismos momentos de la simulación en que lo hace la densidad de tráfico, manteniendo la relación entre las estadísticas y la consistencia de los resultados.

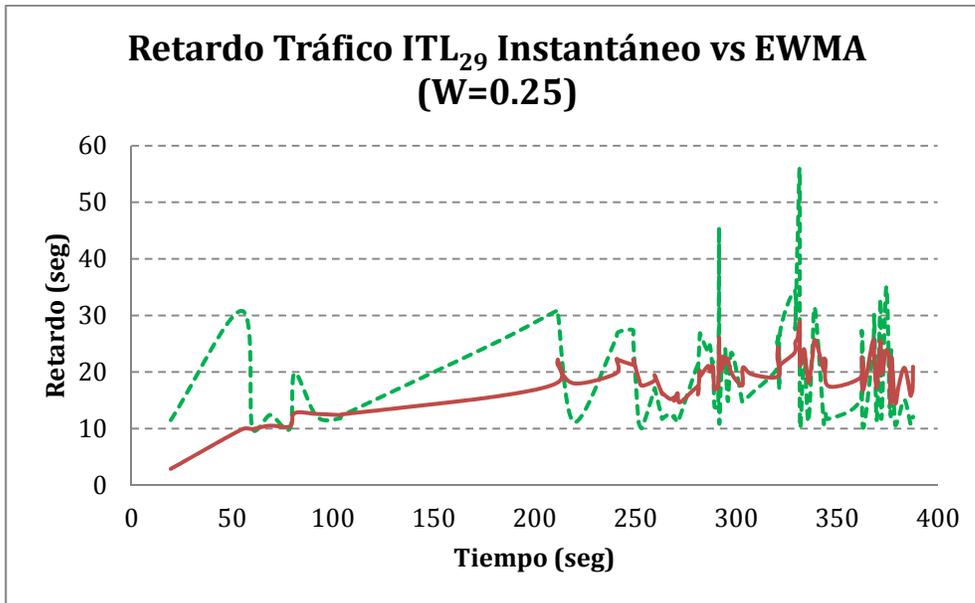


Figura 24. Resultados Retardo de Tráfico ITL₂₉.

Fuente: Autoría Propia.

La Figura 25 muestra las estadísticas de retardo de tráfico del semáforo inteligente 29 utilizando un valor de α de 0.125 y un Intervalo de Confianza del 90%. En este gráfico se puede apreciar los valores máximos alcanzados por la estadística de retardo, el cual tiene un valor aproximado de 24 segundos, valor similar al obtenido por el ITL₄₄.

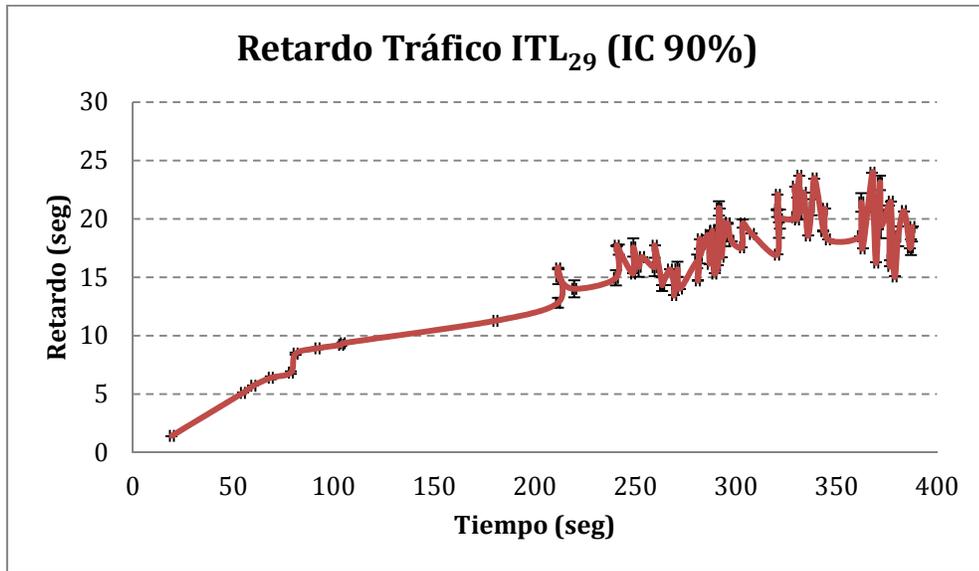


Figura 25. Resultados Retardo de Tráfico ITL₂₉ IC 90%.

Fuente: Autoría Propia.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

La introducción de los Sistemas de Transporte Inteligentes (STI) aplicados a las comunicaciones entre infraestructura de transporte y vehículos tiene por objeto la mejora de la seguridad vial en las carreteras. Las organizaciones públicas como la Unión Europea, así como los fabricantes de vehículos, están enfocando sus esfuerzos en el desarrollo de este tipo de comunicaciones con el fin de implementarlas durante los próximos años. De este modo ciudades como Barcelona están siendo utilizadas como *Living Labs* para probar estas nuevas tecnologías en ambientes de la vida real. Sin embargo, la prueba de dichas tecnologías en entornos reales es sumamente costoso y difícil (serían requeridos centenas de vehículos equipados con la tecnología a probar) de modo que el uso previo de simuladores de red para el desarrollo y prueba de estas tecnologías antes de su implementación real es obligatorio.

En este Trabajo Especial de Grado, se presenta el diseño de un marco de Ciudad Inteligente con el fin de explicar cómo las ciudades del futuro se comunicarán con los vehículos que circulan a su alrededor y a través de ellas. En este marco de ciudad inteligente un conjunto de semáforos inteligentes (SI) implementados en los alrededores de la ciudad recolectarán información estadística, con respecto a la densidad y al retardo del tráfico, a partir del paso de vehículos y compartirán estos datos con una sub-red de semáforos inteligentes. Al mismo tiempo, dicha sub-red enviará periódicamente mensajes de advertencia a los vehículos en su radio de cobertura informando sobre la densidad y retardo del tráfico y las condiciones climáticas, con el fin de mejorar la seguridad vial, el ahorro de combustible y la reducción del tiempo de trayecto de los conductores. Este escenario de ciudad inteligente ha sido evaluado en este Trabajo Especial de Grado con la utilización de

un simulador de redes, NCTUns, específicamente modificado para la simulación del sistema de recolección y procesado de estadísticas de tráfico propuesto.

La primera conclusión que puede ser extraída a partir de este Trabajo Especial de Grado, es que la inclusión de nuevas capacidades en el simulador (sistema estadístico en los semáforos inteligentes), mejora la calidad de las simulaciones de ciudades inteligentes. Esta calidad está demostrada en la adaptación del sistema estadístico implementado a los cambios introducidos en el escenario de simulación, traducidos en la movilidad de los nodos (vehículos), gestionados por el módulo interno del simulador denominado *CarAgent*. La información estadística obtenida gracias al sistema estadístico desarrollado en este proyecto podría ser utilizada en protocolos de enrutamiento de paquetes, así como para la toma de decisiones en los protocolos de enrutamiento de tráfico que ayuden al conductor a evitar embotellamientos, atascos y accidentes, logrando menos emisiones de CO₂ y una ciudad inteligente sostenible.

Estos cambios introducidos en el código del simulador han sido probados con un objetivo general: comprobar el funcionamiento correcto del sistema de recolección y procesado de estadísticas así como también del simulador. Luego de la fase de prueba de funcionamiento se puede concluir que funcionan de una manera óptima tal y como se esperaba en la fase de diseño. Como se observa, la infraestructura inteligente se puede comunicar entre sí para recolectar, calcular y compartir estadísticas en tiempo real.

A pesar que las nuevas modificaciones añadidas al simulador funcionaron correctamente y como se esperaba, no todas las ideas propuestas en el marco de la ciudad inteligente lo hicieron. En concreto, el semáforo inteligente 29 propuesto inicialmente como un semáforo ubicado a las afueras de la ciudad, tuvo el comportamiento de un semáforo adyacente al centro de la ciudad debido a la proximidad que tenía con el *down-town* y a que el escenario simulado era de dimensiones reducidas. Para obtener resultados de un semáforo inteligente que se

encuentre a las afueras de la ciudad debe ser diseñado otro tipo de escenario en el que existe un área apartada del centro de la ciudad el cual simule un suburbio. En cuanto al resto de ideas que conforman el marco de la ciudad inteligente, todas mostraron comportamientos similares a los esperados durante la fase de diseño.

Finalmente, se concluye que el uso de Sistemas de Transporte Inteligentes hace que los caminos y carreteras sean más seguros, los trayectos sean más eficientes ambientalmente y que los tiempos de viaje sean más reducidos.

En cuanto a las recomendaciones de este Trabajo Especial de Grado, refiriéndose al simulador de redes NCTUns, en este documento se incluye la información necesaria para modificar el código del mismo. Además, se describe como los diferentes módulos se pueden comunicar entre sí a través del uso de archivos y el funcionamiento del módulo principal. Por lo tanto, estos módulos podrían ser fácilmente modificados haciendo posible la creación de diferentes formas de comunicación entre vehículos e infraestructura de tráfico.

En el apartado de las redes híbridas (HSVN), éstas podrían utilizarse no sólo para aumentar la seguridad vial, sino para mejorar la calidad de vida de los conductores. Una aplicación que podría estudiarse e implementarse utilizando NCTUns sería el uso de este tipo de redes para encontrar puestos de estacionamientos libres dentro de la ciudad. En este caso, los semáforos inteligentes comunicarían a los vehículos circundantes dónde encontrar puestos de estacionamiento libres dentro de su área de cobertura. Con esta información el asistente de navegación del conductor podría indicarle dónde estacionar, indicándolo en el mapa de la ciudad. Por otra parte, si el lugar de estacionamiento es de pago el asistente de navegación también podría utilizarse para realizar el pago. La aplicación de esta red híbrida funcionaría de la siguiente forma: una red WSN obtiene información acerca de la localización de los puestos de estacionamiento disponibles dentro de la ciudad, comunicándoselo a la sub-red de semáforos inteligentes (VANET), luego estos semáforos podrían enviar un “mensaje de estacionamiento” a los vehículos circundantes con la información de

dichos puestos para que finalmente el asistente de navegación del vehículo informe al conductor acerca de los lugares libres.

Además, las estadísticas recogidas por los semáforos inteligentes pueden mejorar los protocolos de enrutamiento de datos, seleccionando la ruta que ofrece la mayor probabilidad de enviar un paquete a su destino con éxito. En la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) está en marcha un proyecto cuyo objetivo es el diseño y simulación de un protocolo de enrutamiento para redes VANET que considera un sistema de actualización de estadísticas similar al desarrollado en este Trabajo Especial de Grado.

Como se ve, las líneas futuras se mantienen abiertas luego de realizado este proyecto. Sin embargo, los futuros proyectos que impliquen comunicaciones entre vehículos e infraestructura podrían tomar este trabajo como punto de partida realizando modificaciones e implementaciones adicionales o añadiendo diferentes tipos de estadísticas al sistema de recolección y cómputo propuesto.

Los resultados obtenidos en este Trabajo Especial de Grado fueron publicados en un artículo de conferencia enviado al *Intelligent Vehicles Symposium (IV '12)*, el cual se llevó a cabo del 3 al 7 de junio de este mismo año en Alcalá de Henares, España a cargo de la *IEEE Intelligent Transportation System Society (ITSS)*.

Bibliografía

- Biagioni, E.; Brifges, K.; Chee, B. J. (10 de 2005). *PODS: A remote Ecological Micro Sensor Network*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking
- CARLINK. (s.f.). *CARLINK: Project Consortium*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://carlink.lcc.uma.es/>
- CAR2CAR. (s.f.). *Car 2 Car Communication Consortium*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.car-to-car.org/>
- Cayirci, E.; Coplu, T. (2007). *SENDROM: Sensor Networks for Disaster Relief Operations Management*. Wireless Network Journal Volumen 13 Edición 3
- COMeSafety. (s.f.). *COMeSafety: Communication For eSafety*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.comesafety.org/>
- CORDIS. (s.f.). *CORDIS: Community Research and Development Information Service*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: http://cordis.europa.eu/home_en.html
- COOPERS. (s.f.). *COOPERS: Cooperative Systems For Intelligent Road Safety*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.coopers-ip.eu/>
- CVIS. (s.f.). *CVIS: Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.cvisproject.org/>
- Dang, T.; Frolov, S.; Nulusu, N.; Baptista, A. (2007). *Near Optimal Sensor Selection in The Columbia RIvEr (CORIE) Observation Network for Data Assimilation Using Genetic Algorithms*. Tercera Conferencia Internacional IEEE Distributed Computing in Sensor System DCOSS'07

- Díaz Malásquez, L. (17 de 11 de 2007). *Ciudades Sostenibles*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.slideshare.net/guestda6e48/ciudades-sostenibles>
- ESAFETYAWARE. (s.f.). *eSafety Aware*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.esafetyaware.eu/>
- ENTEL. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://bowie.upc.es/vmware/vm-fedora.tgz>
- Giffinger, R. (10 de 2007). *Smart Cities Ranking of European Medium-Sized Cities*. Recuperado el 15 de 06 2012, de sitio Web: http://www.smart-cities.eu/download/smart_cities_final_report.pdf
- IBM. (2011). *Smarter Traffic: IBM*. Recuperado el 27 de 02 de 2011, de sitio Web de IBM: http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/traffic_congestion/ideas/
- Instituto Metropolitano de Urbanismo. (29 de 09 de 2010). *Caos en el Tráfico Vehicular de Caracas: Alcaldia Metropolitana de Caracas*. Recuperado el 26 de 02 de 2011, de sitio Web de Alcaldia Metropolitana de Caracas: http://www.imutc.org/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=261:caos-en-el-trafico-vehicular-de-caracas&catid=38:noticias&Itemid=83
- Itriago, A. (13 de 09 de 2008). *Tráfico en Caracas se resuelve con 300 kilómetros más: Radio Mundial*. Recuperado el 27 de 02 de 2011, de sitio Web de Radio Mundial: <http://www.radiomundial.com.ve/yvke/noticia.php?11510>
- Labiod, H. (2008). *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Wiley-ISTE. ISBN:1848210035
- NOW. (s.f.). *NOW: Network On Wheels*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.network-on-wheels.de>

- NEC Laboratory Europe (01 de 2002). *FleetNet – Internet On The Road: Ad Hoc Radio Network for Internet Vehicle Communications*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web de NEC Laboratory: http://www.neclab.eu/NEC_Heidelberg_Dateien/Fleetnet_flyer.pdf
- OICA. (s.f.). *2011 Production Statistics: OICA*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web de OICA: <http://oica.net/category/production-statistics/>
- OICA. (s.f.). *Man-Made CO₂ Emissions: OICA*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web de OICA: <http://oica.net/category/climate-change-and-co2/>
- OICA. (s.f.). *CO₂: OICA*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web de OICA: <http://oica.net/wp-content/uploads/climate-change-and-co2-brochure.pdf>
- Olariu, S; Weigle. M. (2009). *Vehicular Networks, From Theory To Practice*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Open Living Labs. (s.f.). *European Network of Living Labs*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.openlivinglabs.eu/>
- Prakash, D.; De Morais, C. (2006). *Ad Hoc and Sensor Networks*. World Scientific
- PreVENT. (s.f.). *PreVENT*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.prevent-ip.org/>
- SAFESPOT (s.f.). *SAFESPOT Integrated Project*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.safespot-eu.org/>
- Schwiebert, L.; Gupta, S. K. S; Weinmann, J. (2001). *Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors*.
- SEVECOM (s.f.). *SEVECOM: Secure Vehicle Communication*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.sevecom.org/>

- VMware. (s.f.). *VMware Player*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: <http://www.vmware.com/products/player/>
- VMware. (s.f.). *Getting Started Guide – VMware Player 3.1*. Recuperado el 15 de 06 de 2012, de sitio Web: http://www.vmware.com/pdf/vmware_player310.pdf
- Wang, S. Y.; Lin, C. C.; Huang, C. C. (2010). *Peer-to-Peer Networks and Internet Policies*. Capítulo: *NCTUns Tool for Evaluating the Performances of Real-Life P2P Applications*. Nova Science Publishers. ISBN: 9781608762873
- Zhao, F.; Guibas, L. J. (2004). *Wireless Sensor Networks*. Morgan Kaufman

Apéndices

Apéndice A: Glosario de Acrónimos

ACK	ACKnowledgment
AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
ATT	Advance Transport Telematics
C2C-C	Car to car Communication Consortium
CAR-2-X	Car to both car and infrastructure
COMeSafety	Communications for eSafety
CPU	Central Processing Unit
CVIS	Co-operative Vehicle-Infrastructure Systems
DAB	Digital Audio Broadcast
DRIVE	Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe
ENTEL	Departament d'ENginyeria TELEmàtica
EU	European Union
EUREKA	European Research Coordination Agency
FIA	Fédération Internationale de l'Automobile
FP	Framework Program
GPRS	General Packer Radio Service
GPS	Global Positioning System
GRUB	Grand Unified Bootloader
GUI	Graphical User Interface
HSVN	Hybrid Sensor and Vehicular Network
ID	IDentification

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information Technology
ITS	Intelligent Transportation System
LDM	Local Dynamic Map
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc NETWORK
NCTUns	National Chiao Tung University Network Simulator
NOW	Network On Wheels
OS	Operating System
P2P	Peer to Peer
PC	Personal Computer
PHY	Physical
PROMETHEUS	Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety
RERR	Route ERROR message
RREP	Route REPLY message
RREQ	Route REQuest message
SN	Sensor Node
TCP	Transfer Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VANET	Vehicular Ad-hoc NETWORK
VM	Virtual Machine
VoIP	Voice over Internet Protocol
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WSN	Wireless Sensor Network

**Apéndice B: Artículo Propuesto para Simposio de Vehículos
Inteligentes de la IEEE (IV'12)**

Smart city for VANETs using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights

Carolina Tripp Barba, Miguel Ángel Mateos, Pablo Regañás Soto, Ahmad Mohamad Mezher, Mónica Aguilar Igartua
Departament d'Enginyeria Telemàtica.
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona, Spain
{ctripp, monica.aguilar, ahmad.mezher}@entel.upc.edu, {miguel.4.mateos, pauregas}@gmail.com

Abstract—Road safety has become a main issue for governments and car manufacturers in the last twenty years. The development of new vehicular technologies has favoured companies, researchers and institutions to focus their efforts on improving road safety. During the last decades, the evolution of wireless technologies has allowed researchers to design communication systems where vehicles participate in the communication networks. Thus, new types of networks, such as Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs), have been created to facilitate communication between vehicles themselves and between vehicles and infrastructure. New concepts where vehicular networks play an important role have appeared the last years, such as smart cities and living labs [1]. Smart cities include intelligent traffic management in which data from the TIC (Traffic Information Centre) infrastructures could be reachable at any point. To test the possibilities of these future cities, living labs (cities in which new designed systems can be tested in real conditions) have been created all over Europe. The goal of our framework is to transmit information about the traffic conditions to help the driver (or the vehicle itself) take adequate decisions. In this work, the development of a warning system composed of Intelligent Traffic Lights (ITLs) that provides information to drivers about traffic density and weather conditions in the streets of a city is proposed and evaluated through simulations.

Index Terms—Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs), Traffic Information Centre (TIC), Smart Cities, Intelligent Transportation System (ITS).

I. INTRODUCTION

During the last few years, progress in wireless communications has offered new research fields, providing network connectivity in environments where wired solutions are impossible. Among these, vehicular ad hoc networks (VANETs) are attracting a growing attention due to the promising important applications, from road safety to traffic control and entertainment for passengers. Smart cities would like to plan how to minimize their transportation problems due to the increasing population that produces congested roads. VANETs aim at helping to alleviate this issue improving vehicles' mobility, increasing road safety and also seeking to have more sustainable cities.

At the beginning of the development of vehicular technologies, the main goal was to have more efficient and safer roads. Nowadays, thanks to the huge development of wireless technologies and their application in vehicles, it is possible to use Intelligent Transportation System (ITS) that

will change our way to drive, improve road safety, and help emergency services. VANETs may soon allow vehicles to easily communicate among themselves and also with fixed infrastructure. This will not only improve road safety, but also raise new commercial opportunities such as infotainment for passengers.

Car accident prevention, safer roads, pollution and congestion reduction are some of the goals of VANETs. The deployment of an efficient system to manage warning messages in VANETs has important benefits, from the perspective of both road operators and drivers. Efficient traffic alerts and updated information about traffic incidents will reduce traffic jams, increase road safety and improve the driving in the city. Furthermore, from the sustainable and economic perspective, real-time traffic alerting will reduce trip time and fuel consumption and therefore decrease the amount of CO₂ emissions [2].

In this work, a smart city framework has been developed in where intelligent traffic lights (ITLs) set in the crossroads of a city are involved. These ITLs are in charge of gathering traffic information (e.g. traffic density) from passing vehicles, updating traffic statistics of the city and reporting those statistics to the vehicles. Also, ITLs will send warning messages to vehicles in case of accidents to avoid further collisions.

The rest of the paper is organized as follows. Section II gives a state of the art of some relevant works of VANETs using ITS. Section III introduces our smart city framework. Section IV presents our proposal to calculate the vehicles' density in the city using ITLs. Section V summarizes our proposed scheme of warning messages. Section VI shows simulation results. Finally, section VII gives conclusions and future work.

II. STATE OF THE ART

During the last decades, Intelligent Transportation Systems (ITS) have emerged as an efficient way to improve the performance of the flow of vehicles in the roads. The goals of ITLs are road safety, comfortable driving and distribution of updated information about the roads. Many proposals about ITS have been presented in recent years. In this section some works about ITS in smart cities are highlighted.

The work in [3] is a survey about multifunctional data-driven intelligent transportation system (D²ITS), which are supported by a large amount of data collected from various

resources: Vision-Driven ITS (input data collected from video sensors and used recognition including vehicle and pedestrian detection); Multisource-Driven ITS (e.g. inductive-loop detectors, laser radar and GPS); Learning-Driven ITS (effective prediction of the occurrence of accidents to enhance the safety of pedestrians by reducing the impact of vehicle collision); and Visualization-Driven ITS (to help decision makers quickly identify abnormal traffic patterns and accordingly take necessary measures).

In [4] and [5] two adaptive traffic light systems based on wireless between vehicles and fixed controller nodes deployed at intersections are designed and developed. These systems improve traffic fluency, reduce the waiting time of vehicles at intersections and help to avoid collisions.

The e-NOTIFY [6] system was designed for automated accident detection, reporting to the Emergencies Coordination Center, and assistance of road accidents using the capabilities offered by vehicular communication technologies. e-NOTIFY focus on improving post collision care with a fast and efficient management of the available emergency resources, which increases the chances of recovery and survival for those injured in traffic accidents.

In this work, we focus on the development of a smart city framework using intelligent infrastructure in the streets, in our case intelligent traffic lights (ITLs). ITLs provide warning messages to the passing vehicles to inform drivers about traffic and weather conditions of the different streets of the city. This way, the smart city framework can help drivers to have a better trip, reducing time to destination, preventing accidents and traffic jams and also saving petrol and reducing pollution. As [3], our proposal manages traffic information seeking to avoid accidents, although the information here is gathered from the vehicles themselves so no further infrastructure is needed. Also our proposal could easily be used by the traffic information centre to design an adaptive traffic light system similar to [4] and [5].

III. SMART CITY FRAMEWORK

The smart city framework we have designed includes ITLs set in some of the crossroads. These ITLs collect real-time traffic data from the passing vehicles and calculate traffic statistics such as traffic density in the adjacent streets (between consecutive crossroads). At the same time, these ITLs can communicate the traffic information to passing vehicles and alert them with warning messages in case of accidents. These ITLs also form a sub-network that allows ITLs to share the collected information and calculate statistics of the whole city. Thus, vehicles are well informed of the traffic situation in the city. The following sections describe how this smart city framework is designed and which use the ITL will have.

In the smart city projected, blocks have a regular square design and buildings on its four sides. ITLs are responsible of managing the traffic of the vehicles, which form a VANET. These ITLs do not have to be located at each intersection. Within all the traffic lights that are traditionally located in a city, only a few will be replaced by ITLs. This is because

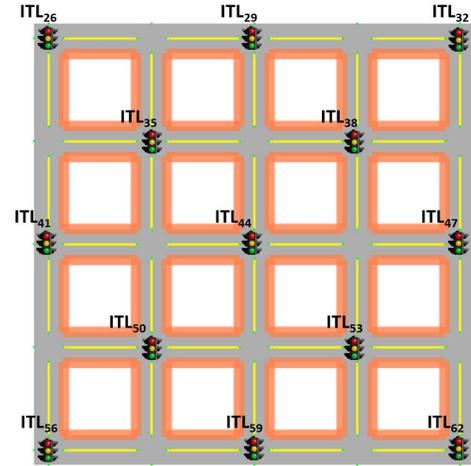


Fig. 1. Intelligent Traffic Lights distribution

each ITL covers a whole intersection and the 4 streets that converge on this intersection. ITLs are placed as shown in Fig. 1. To cover all this area the antenna pattern used is an omnidirectional propagation pattern. Therefore, each ITL receives data from all passing vehicles on its cover range (the four streets and the intersection). Not having an ITL on each intersection is more economic when implementing this framework.

It is assumed that vehicles have a global positioning system (GPS) device, a driver assistant device, full map information of the city including the position of the ITLs. Thus, vehicles can easily select which is the nearest ITL.

Every ad-hoc node (i.e., ITLs and vehicles) set on the scenario was configured with Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [8] routing protocol. AODV was selected because of its simplicity. Although it is well known that AODV is not suitable as routing protocol of general use in VANETs, there are some applications that might work well with AODV. The advantage of AODV is its simplicity and widespread use. The main drawback is that AODV needs end-to-end paths for data forwarding, which is difficult to handle because in VANETs end-to-end paths last not much due to high speeds of vehicles. Other routing protocols that use other strategies like greedy forwarding and geographical routing. For instance, GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [9] and GOSR (Geographical Opportunistic Source Routing) [10] have shown good performance in VANETs, but at the cost of greater complexity and increased delay. Nonetheless, for some applications that require a short delay AODV can perform well. In this paper we are considering smart city services where vehicles send warning messages (weather conditions and traffic density) to the closest ITL, so it is not necessary to establish long paths that last long. Instead, vehicles need to establish very short paths (1-2 hops) to the nearest ITL. Besides, the communication must be quickly since vehicles move fast and the period in coverage range of the ITL is short. Thus, AODV is suitable for our purposes.

TABLE I
FORMAT INFORMATION OF MESSAGE STAT

Type	Statistic Message (SM)	STAT
<i>stat_type</i>	Traffic density (TD_{st})	0
<i>stat_my_id</i>	Car sending statistics	C_i
<i>stat_neighbours</i>	Number of neighbours (NoN)	NoN_i
<i>stat_time</i>	Time of statistics report	t_i
<i>stat_dst</i>	ITL IP address	ITL_i

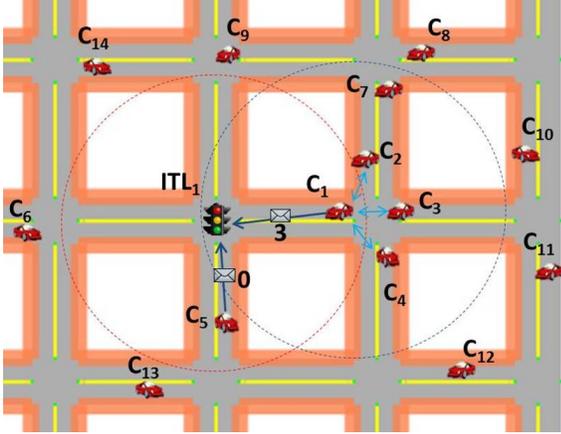


Fig. 2. ITL obtaining traffic statistics in its intersection

IV. MANAGEMENT OF TRAFFIC DENSITY

In this work we focus on the analysis of traffic density, although similar analysis could easily be done for other traffic statistics (e.g. number of passengers, trip time).

The messages sent by each vehicle to an ITL include the type of message (a new message called Statistic Message, SM), the identification of the vehicle (C_i) sending the message, the current value of the number of neighbours (NoN_i) in its coverage range at that moment, the moment in which the message was sent (t_i) and the IP address of the ITL destination (ITL_i). This message is sent by the vehicles each 2 sec. This way, a car ($v=40$ km/h) sends 5 messages while it crosses a 100 m. street. The format of this message is shown in Table I. The ITL will update the traffic statistics upon the reception of each new message, as it is explained below.

Fig. 2 shows the procedure of getting and sending traffic statistics from the vehicles to the ITLs. Each vehicle interchanges hello messages (HM) with its neighbours and this way it knows the amount of vehicles on its transmission range. Then, the vehicle sends a Statistic Message (SM) with the number of neighbours to the nearest ITL. For example, C_1 counts with three neighbours (C_2 , C_3 , and C_4). Notice that although C_7 is inside its range they cannot establish any communication because of the buildings that represent obstacles. The car C_5 does not see any neighbour around so it sends a SM to the nearest ITL with a zero on it.

ITL_1 will receive the SMs and will update the traffic density statistics by using an exponential weighted moving average (EWMA) to average current and historical values. Then, ITL_1 will store the results properly and will share its statistics

with the others ITLs in the city through the sub-network they form. The day has been divided into five periods due to the usually variable traffic densities in a city throughout the day. Thus, every ITL updates the traffic density per periods: $TDst_{6-9}$, $TDst_{9-12}$, $TDst_{12-15}$, $TDst_{15-18}$, $TDst_{18-21}$. For instance, $TDst_{6-9}$ gathers the average traffic density in the city, during week days, from 06:00 AM to 09:00 PM. The value $TDst_{6-9}$ will continuously be updated using Eq. (1), where w is a small weight (e.g. $w=0.25$) to smooth out isolated deviations, $\overline{TDst}_{6-9,i}$ is the updated average in iteration i and $TDst_{6-9}$ is the last value received by that ITL. The same computation will be done for the other periods of the day.

$$\overline{TDst}_{6-9,i} = w \cdot \overline{TDst}_{6-9,i-1} + (1 - w) \cdot TDst_{6-9} \quad (1)$$

The ITLs of the city share that traffic information and after that, each ITL will send back to each passing vehicle a message with the updated traffic statistics of the city on that period of time. With this information, the driver's assistant device can take proper trip decisions (e.g. avoiding congested roads). Also, data routing protocols may use that information to take suitable forwarding decisions (e.g. forward the packet through denser streets where there are more possible forwarding nodes).

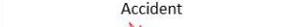
V. MANAGEMENT OF WARNING MESSAGES

In the promising smart cities of near future, communications between vehicles and the city will be constant, including infrastructure-to-infrastructure, car-to-car and infrastructure-to-car communications, by means of city infrastructure and Traffic Information Centres (TICs). These packets will contain different type of information and should be prioritized accordingly. For instance, packets containing information about an accident have to be prioritized over those containing other kind of data such as entertainment data.

Upon the reception of a warning message, a vehicle should consider its current distance to the initial source of the warning message and act consequently. For instance, a car being a long distance away from an accident will not act the same way (i.e., will not brake) when receiving a warning about the accident since it does not affect the immediate security of that car. Nonetheless, that warning message will inform the driver of that car (actually, the driver's assistant device), who may vary the trip plan consequently.

We have implemented a simple warning service to prevent further collisions by alerting drivers about accidents and dangerous road conditions. To achieve that goal, vehicles send short warning messages once one of the situations depicted in Table II has been detected. This information can be obtained from different sources. Regarding weather, data can be collected by a Wireless Sensor Network (WSN) that periodically transmits the weather conditions to the nearest ITL. Also, from small weather stations set in a few ITLs of the city. This information is spread through the city using

TABLE II
WARNING MESSAGES: TRAFFIC AND WEATHER CONDITIONS

Traffic density (2-bit)	Weather (2-bit)	Warning message: reduce speed
Free road segment 	Sun	U
	Rain	85% · U
	Storm	65% · U
	Ice	40% · U
Semi-congested road segment 	Sun	75% · U
	Rain	50% · U
	Storm	25% · U
	Ice	10% · U
Very congested road segment 	Sun	50% · U
	Rain	40% · U
	Storm	30% · U
	Ice	10% · U
Accident 	Sun	0
	Rain	0
	Storm	0
	Ice	0

U : Initial driver speed

the sub-network formed by the ITLs. Complementarily, the forecast proportioned by local public weather services could be used as well. The sub-network of ITLs could share that forecast information obtained from an Internet access point set in one of the ITLs. In case of accident, the vehicle itself (using sensors that detect that the car suffered an accident) communicates this situation to the closest ITL and to the neighbouring vehicles.

To know the traffic density, each ITL uses the statistics collected by the network of ITLs in the city (as explained in the previous section) regarding the average number of neighbours per vehicle in the streets along the day. Thus, depending on the average number of neighbours, two adaptive thresholds determine the traffic density of the road: free, semi-congested or very congested (see Table II).

We use a 4-bit field in the warning messages to code traffic density (2 bits) and weather information (2 bits). The warning message also includes a field with the location of the initial place of the warning message. Nearby vehicles that receive such message will reduce their speed depending on the warning message according to Table II. For instance, in a very congested road with rain condition, warning messages inform nearby vehicles to reduce their speed to 20% of the initial driver speed (U in Table II). The driver's assistant device in the vehicle will make the vehicle brake accordingly.

VI. SIMULATION RESULTS

In this work, we evaluate the performance of the vehicles of a VANET in a smart city using warning messages and traffic statics managed by the ITLs set in some crossroads of the city. To achieve this evaluations we use the network simulator NCTUns 6.0 [7]

A. Configuration of Intelligent Traffic Lights (ITLs)

ITLs are implemented using Multi-Interface Mobile nodes with two wireless ad-hoc interfaces configured in two different

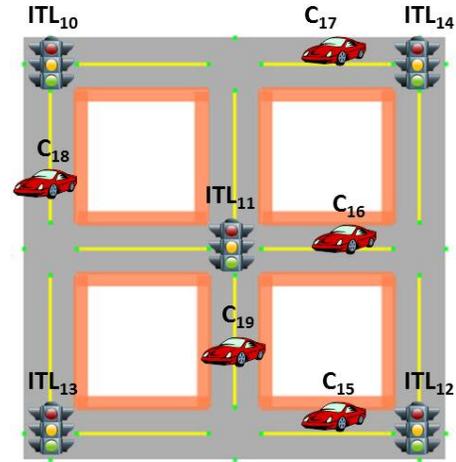


Fig. 3. Simulation scenario of a car accident

sub-networks. One of the interfaces of the ITL will communicate with vehicles and the other interface will communicate with the other ITLs in the city.

To ensure node connectivity between ITLs, interface two (used to connect with other ITLs) is determined by the distance needed to cover 300 m between crossroads. Interface one (used to connect with vehicles) communicates with the passing vehicles. As the streets have a length of 100 m, and the intersection of 40 m, this interface is configured to cover 130 m. Both interfaces have an omnidirectional propagation diagram. As each vehicle is only supposed to connect to interface one of the ITL and also to other cars, the transmission range of vehicles is configured to cover 130 m in an omnidirectional pattern.

To ensure that it could be possible to differentiate data communication of the two wireless ad-hoc interfaces, they are configured with two different sub-networks. The sub-network used by the ITLs to collect, send and calculate statistics from the vehicles is "1.0.3.XX/24", whereas the sub-network used to communicate ITLs among themselves is "1.0.2.XX/24".

There are only a few ITLs among the regular traffic lights. In this case, an ITL receives data from any passing vehicle from any of the four streets covered by that ITL.

B. Benefits of Using Warning Messages after Accidents

To evaluate the operation of warning messages, we use an urban scenario to show how the vehicles react under different traffic and weather conditions. Fig. 3 shows a neighbourhood of the city where a car accident will happen. The simulation recreates a Manhattan 280x280 m² scenario. The length of the streets is 100 m, and the size of every cross is 40 m. These values were chosen to emulate the regular streets in the city of Barcelona, Spain. In the scenario there are 5 vehicles and 5 ITLs. During the simulation, vehicle C₁₈ has an accident and remains broken close to the intelligent traffic light ITL₁₁ situated in the centre, see Fig. 3. Vehicles C₁₅, C₁₆, C₁₇ and C₁₉ are all travelling towards ITL₁₁. In this simulation it is shown how the use of ITL helps to avoid collision

TABLE III
TRAFFIC AND WEATHER CONDITIONS DURING THE SIMULATION

Traffic conditions	Weather conditions	Period of time	Average vehicle velocity
Free segment	Sun	30 s	40 km/h
Accident	Sun	50 s	0 km/h

TABLE IV
SIMULATION SETTINGS

Parameter	Value
Medium capacity	11 Mbps
Packet size	256 bytes
Transmission range	130 m
Carrier sense range	180 m
Simulation time	80 sec
MAC specification	IEEE 802.11b
Area	280 x 280 m ²
Maximum Average speed	40 km/h
Number of nodes	5 ITLs and 8 vehicles
Mobility model	CarAgentMod (NCTUns)
Routing protocol	AODV

among the other vehicles and the broken vehicle, thanks to our warning scheme that makes them brake beforehand. Table III summarizes the traffic and weather conditions during the simulation.

The accident will occur in the second 30. The traffic lights number ITL₁₀, ITL₁₂, ITL₁₃ and ITL₁₄ will send messages of *good weather conditions* and *free traffic segment* during the 80 sec of this simulation. The traffic light number ITL₁₁ will send during 30 sec messages of *good weather conditions* and *free traffic segment*. After that, ITL₁₁ will send *good weather conditions* and *accident* during the next 50 sec. Each of the ITLs sends these packets to the vehicles in the four streets that go from the crossroads where they are located to the next 4 closest crossroads.

ITLs will broadcast 256 bytes messages every 0.2 seconds (i.e. 5 messages each second) with information about traffic conditions, weather conditions and accident warnings. Vehicles move randomly through the streets at an average velocity of 40 km/h (it automatically decreases when approaching an intersection and the vehicle turns). Simulation settings are summarized in Table IV.

The cars in the simulation were represented using smart vehicles equipped with IEEE 802.11b interface on ad-hoc mode. These vehicles are controlled by a program called *agent* (CarAgent.cc) that makes vehicles move through the city respecting streets, crossroads and traffic lights.

TABLE V
DRIVER'S REACTION TIME AND DISTANCE TRAVELLED

	Use of ITLs	Non use of ITLs
Driver's reaction time	0,084 s	1 s
Distance travelled till reaction	0,93 m	11,11 m
Braking period of time	1,355 s	1,355 s
Distance travelled during braking	7,52 m	7,52 m
Total distance travelled	8,45 m	18,63 m

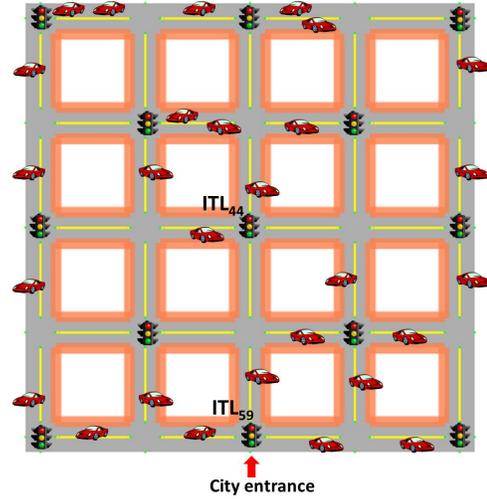


Fig. 4. Traffic density simulation scenario

As it was said in Section III, ad-hoc nodes (i.e. ITLs and vehicles) use AODV. We simply modified AODV to be able to collect traffic statistics while establishing the routing paths. To do that, we use modified RREQ messages that carry SMs (see Table I).

The objective of these simulations is to evaluate if the use of ITLs reduce the driver's reaction time after accidents. According to the *Dirección General de Tráfico* (DGT) [11], responsible of the transportation policy in Spain, the average reaction time of a driver is 1 sec, so a car ($v = 40$ km/h) before start braking still travels 18,63 m. Using our framework the driver's reaction time was 0,084 sec, which represents that the distance travelled will be reduced to 8,45 m. Table V shows the time and distances that a vehicle, in average, travels with and without the use of our smart city framework. In this case, it can be appreciated that the safety distance from the car to the obstacle has been reduced around 55% from 18,63 m without the use of ITLs to 8,45 m using them, which increases road safety notably.

C. Measure of the Traffic Density in the Smart City

To evaluate the operation of the traffic statistics system, we use a Manhattan scenario with streets that form 5x5 blocks (Fig. 4). It has obstacles that represent buildings, and ITLs which are responsible to manage the traffic of the vehicles that form the VANET.

The simulation consists on a random number of smart vehicles moving around the city and establishing communications with the nearest ITL to send information of the current number of neighbours. Traffic statistics are updated as explained in section IV and according to eq. (1). This data is collected every 2 sec. Every time an ITL receives data from a passing car it updates the statistics of traffic density on its surrounding area, stores it on an individual file and shares it with the rest of the ITLs of the city.

Fig. 5 shows the behaviour of the statistics collected by

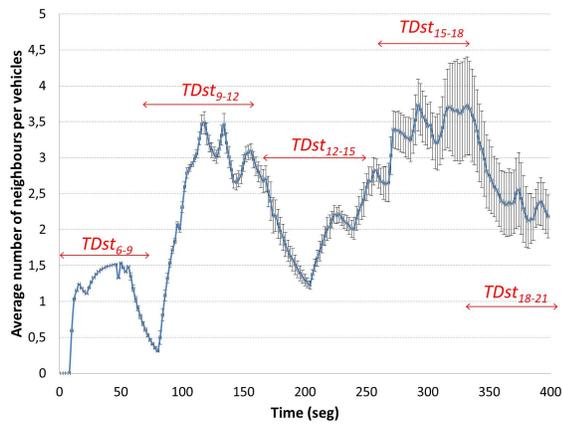


Fig. 5. Average number of neighbours per vehicle measured by ITL₄₄, set in downtown

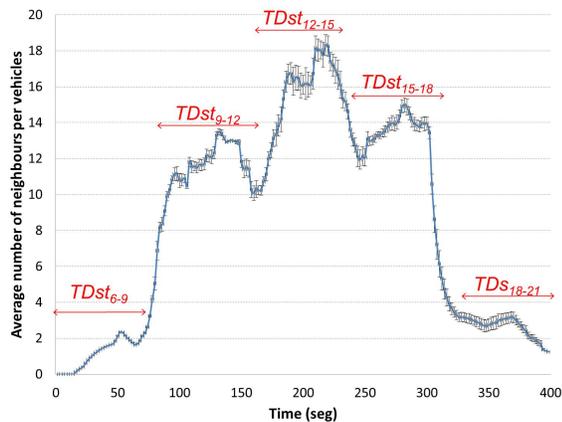


Fig. 6. Average number of neighbours per vehicle measured by ITL₅₉, set in the city entrance

ITL₄₄ (set in downtown, see Fig. 5). Here, simulations show 400 sec (i.e. 15 h from 6 AM to 9 PM), so that 27 sec in the simulations represents 1 h. The results show the density of cars in downtown along the day. With this information drivers can obtain which are the roads more congested in each part of the city. Fig. 6 shows the results obtained by ITL₅₉, which is located in the entrance of the city. We can see the behaviour in one day, where the more congested periods of time are between 12-15 PM. Streets are almost free between 6-9 AM. and 18-21 PM.

VII. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this work we have designed a smart city framework for VANETs that include intelligent traffic lights (ITLs) that transmit warning messages and traffic statistics. We have implemented the framework in the NCTUns 6.0 [7] simulator. Simulation results show that the use of ITLs in smart cities can not only improve road safety but also the driver's quality of life. We have explained how the ITLs gather traffic and weather conditions of the roads and how they update those statistics. The goal is that the driver's assistant device can take

proper trip decisions, for instance to avoid congested roads, and therefore reducing the trip time and pollution as well. Besides, our smart city framework includes warning messages sent by possible broken vehicles to make approaching vehicles brake beforehand and thus avoid more collisions. Simulation results show the effectiveness of this scheme, reducing the distance to brake and the driver's reaction time.

As a near future work, ITLs could communicate to passing vehicles indicating where are the free parking spots in the city. With this information, the driver assistant device could indicate the driver where free spots are located. This system could use a WSN to get the data about free parking spots and communicate it to the nearest ITLs. The ITLs could share that information through the sub-network they form. This would save trip time, petrol and CO₂ as a consequence, which helps to have sustainable smart cities.

Also, statistics collected by the ITLs can improve data routing protocols selecting the path that offers a higher chance to forward a packet to the destination successfully. We will design a VANET routing protocol that considers those statistics in its operation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been partially funded by the Spanish Ministry of Science and Education under the project CICYT CONSEQUENCE (TEC2010-20572-C02-02) and partially supported by the Comissionat per a Universitats i Recerca del DIUE from the Generalitat de Catalunya and the Social European Budget (Fons Social Europeu) with the grant FI-AGAUR; and by the Autonomous University of Sinaloa, México.

REFERENCES

- [1] European Network of Living Labs (ENoLL), <http://www.openlivinglabs.eu/>.
- [2] Ferrari, G., Busanelli, S., Lotti, N., Kaplan, Y., "Cross-Network Information Dissemination in VANETs", 11th International Conference on ITS Telecommunications, pp. 351-356, 2011.
- [3] Junping, Z., Fei-Yue, W., Kunfeng, W., Wei-Hua, L., Xin, X., Cheng, C., "Data-Driven Intelligent Transportation Systems: Survey", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 12, Issue 4, pp. 1624-1639, 2011.
- [4] Maslekar, N., Boussedjra, M., Mouzna, J., Labiod, H., "VANET based Adaptive Traffic Signal Control", IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1-5, 2011.
- [5] Gradinescu, V., Gorgorin, C., Diaconescu, R., Cristea, V., Iftode, L., "Adaptive Traffic Light Using Car-to-Car communications", IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 21-25, 2007.
- [6] Fogue, M., Garrido, P., Martinez, F. J., Cano, J. C., Calafate, C. T., Manzoni, P., Sanchez, M., "Prototyping an Automatic Notification Scheme for Traffic Accidents in Vehicular Networks", Wireless Days (WD) IFIP, pp. 1-5, 2011.
- [7] The NCTUns 6.0 Network Simulator and Emulator. Available at <http://NSL.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>.
- [8] Perkins, C.E., Belding-Royer, E. M., Das, S.R., "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing", IEEE Personal Communications, pp. 16-28, 2001.
- [9] Karp, B., Kung, H. T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless Networks", MobiCom 2000.
- [10] Zhongyi I., Tong, Z., Wei, Y., Xiaoming, L., "GOSR: geographical opportunistic source routing for VANETs", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications, Vol. 13, Issue 1, 2009.
- [11] Dirección General de Tráfico "Revista Tráfico 192", 2011, <http://www.dgt.es/revista/num192/pages/infografias.html>.